МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
КРАСНОЯРСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

КРАСНОЯРСК, 1973

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
КРАСНОЯРСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

М. А. МУРАХОВСКАЯ, А. Ф. БЛИНОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

(Учебное пособие)

КРАСНОЯРСК, 1973

Учебное пособие предназначено для студентов, выполняющих курсовые и дипломные проекты по синхронным двигателям.

В пособии рассмотрены явнополюсные синхронные двигатели мощностью более 100 *квт*: даны формулы, порядок расчета и некоторые сведения по их конструкции. В приложении приведены сведения по электротехническим материалам.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курсовой проект синхронного двигателя выполняют студенты электротехнического факультета.

Цель курсового проекта — ознакомить студентов с современной практикой и основными проблемами проектирования синхронных двигателей, научить их решать самостоятельно реальные инженерные задачи.

Работа над курсовым проектом приучает студентов свободно пользоваться литературой, справочниками, стандартами, заводскими чертежами и расчетными записками, ценниками, каталогами и т. д.

Проект синхронного двигателя выполняется в соответствии с заданием, выдаваемым до начала проектирования (вариант табл. 1).

Задание должно содержать основные данные синхронного двигателя, а также график выполнения проекта по неделям семестра с указанием оценки каждого этапа в процентах от общего объема работы (приложения 1 и 2).

Проект состоит из расчета синхронного двигателя и разработки конструкции (на двух листах чертежей). При электромагнитном расчете определяют основные размеры машины и ее обмоточные данные, на основании которых разрабатывают конструкцию.

1. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Номинальные величины

1. Фазное напряжение при соединении обмотки статора в звезду

$$U_{нф} = \frac{U_{нл}}{\sqrt{3}} \quad в.$$

2. Полная мощность

$$S_н = \frac{P_н}{\eta_н \cos\varphi} \quad ква$$

(значения $\eta_н$ по табл. 2).

3. Фазный ток

$$I_н = \frac{S_н 10^3}{\sqrt{3}\, U_{нл}} \quad а .$$

Главные размеры

4. Число пар полюсов

$$p = \frac{60 f}{n} .$$

5. Расчетная мощность

$$P' = \frac{k_E P_н}{\eta_н \cos\varphi_н} \quad ква ,$$

где $P_н$ — номинальная мощность, квт; $k_E = \frac{E_г}{U_н}$

($E_г$ — результирующая э. д. с. в зазоре машины),
k_E — зависит от $\cos\varphi_н$ и индуктивного сопротивления рассеяния.

Для двигателей с опережающим током при $\cos\varphi_н = 0{,}9$ $k_E \cdot 1{,}05 \div 1{,}06$.

6. Внутренний диаметр статора D предварительно находим по рис. 1, 2.

Наружный диаметр $D_a = 1{,}35 D$ *см*.

По табл. 3 находим ближайший нормализованный внешний диаметр статора D_a и уточняем внутренний

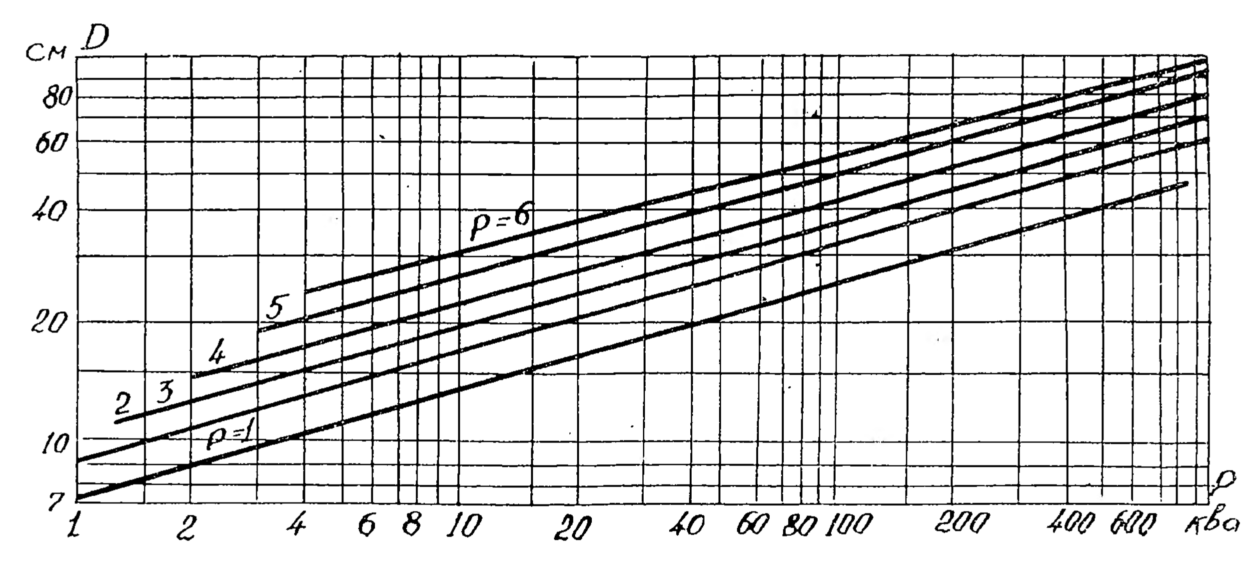
$$D = \frac{D_a}{1{,}35} \quad см .$$

Полученное значение округляем до целого числа.

7. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad см .$$

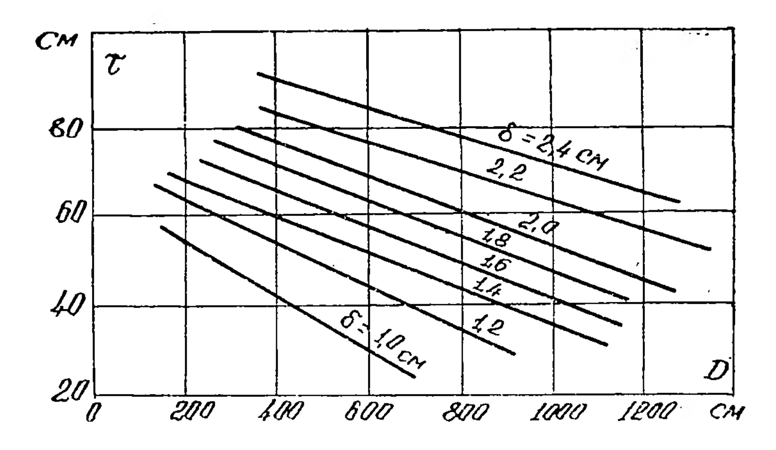
8. Воздушный зазор предварительно определяем по рис. 3.



см D
80
60
40
20
10
7
p=6
5
4
3
2
p=1
1
2
4
6
8
10
20
40
60
80
100
200
400
600
P
ква

Рис. 1.

Рис. 2.



см
τ
80
60
40
20
0
200
400
600
800
1000
1200
см
D
δ=2,4 см
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
δ=1,0 см

Рис. 3.

9. Расчетная длина статора (предварительно)

$$l_\delta = \frac{6{,}1 \cdot 10^7 P'}{\alpha_\delta k_B k_{01} A B_{\delta H} D^2 n} \text{ см}.$$

Коэффициенты α_δ и k_B находим по рис. 4, 5 в зависимости от коэффициента полюсной дуги

$$\alpha_p = \frac{b_p}{\tau},$$

где b_p — действительная полюсная дуга; $\alpha_p = 0{,}55 \div 0{,}75$, причем большие значения — для больших многополюсных машин.

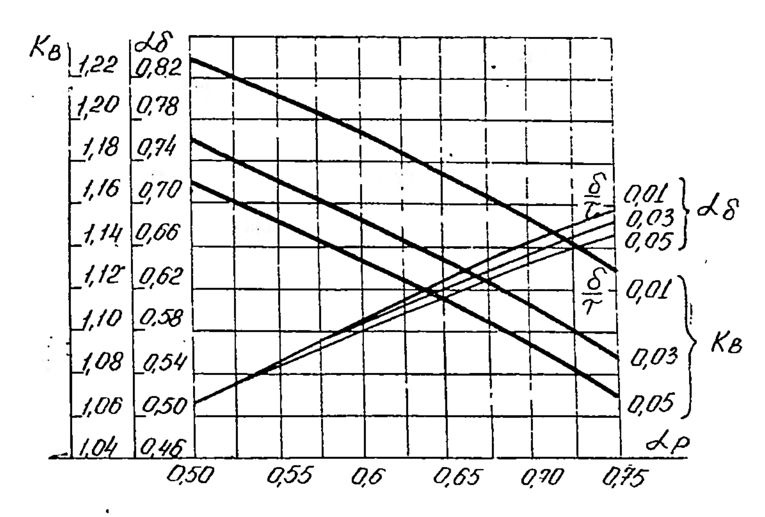


Рис. 4.

У современных явнополюсных машин воздушный зазор делают неравномерным (рис. 6). Отношение максимального зазора $\delta_м$ под краем полюса к минимальному δ в середине полюса $\frac{\delta_м}{\delta}$ можно принять равным 1,5.

k_{01} — обмоточный коэффициент — можно предварительно принять равным 0,92. Это соответствует двухслойным обмоткам с шагом $y = 0{,}83\tau$.

Значения линейной нагрузки А и индукции в воздушном зазоре $B_{\delta п}$ берем предварительно по рис. 7 и 8.

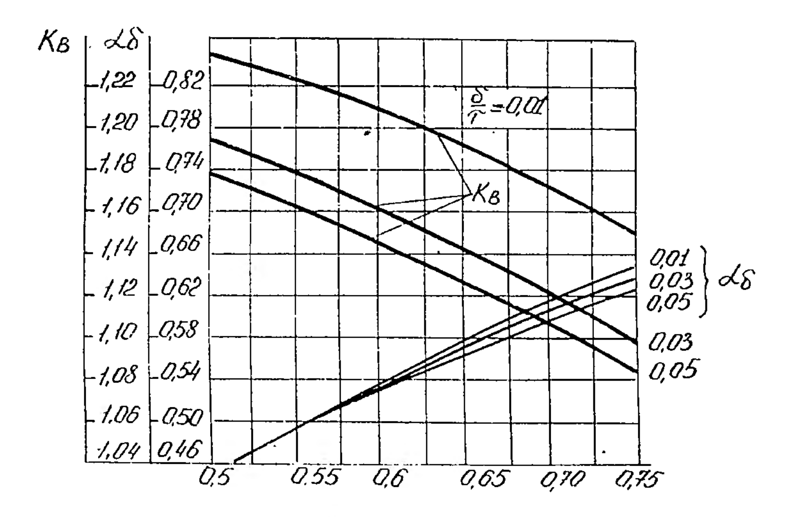


Рис. 5.

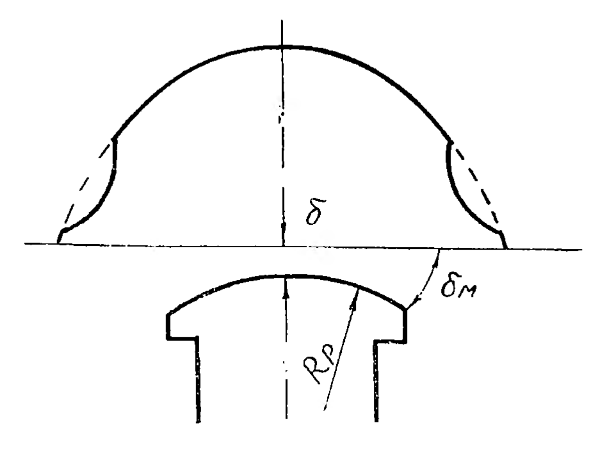


Рис. 6.

При проектировании обмотки и пазов статора и окончательном определении размеров D и l_δ можно несколько отступить от взятых значений A и $B_{\delta н}$.

Отступления должны быть по возможности небольшими, так как при повышении A может оказаться чрезмерной тепловая нагрузка обмотки статора, а при уменьшении A снижается использование машины.

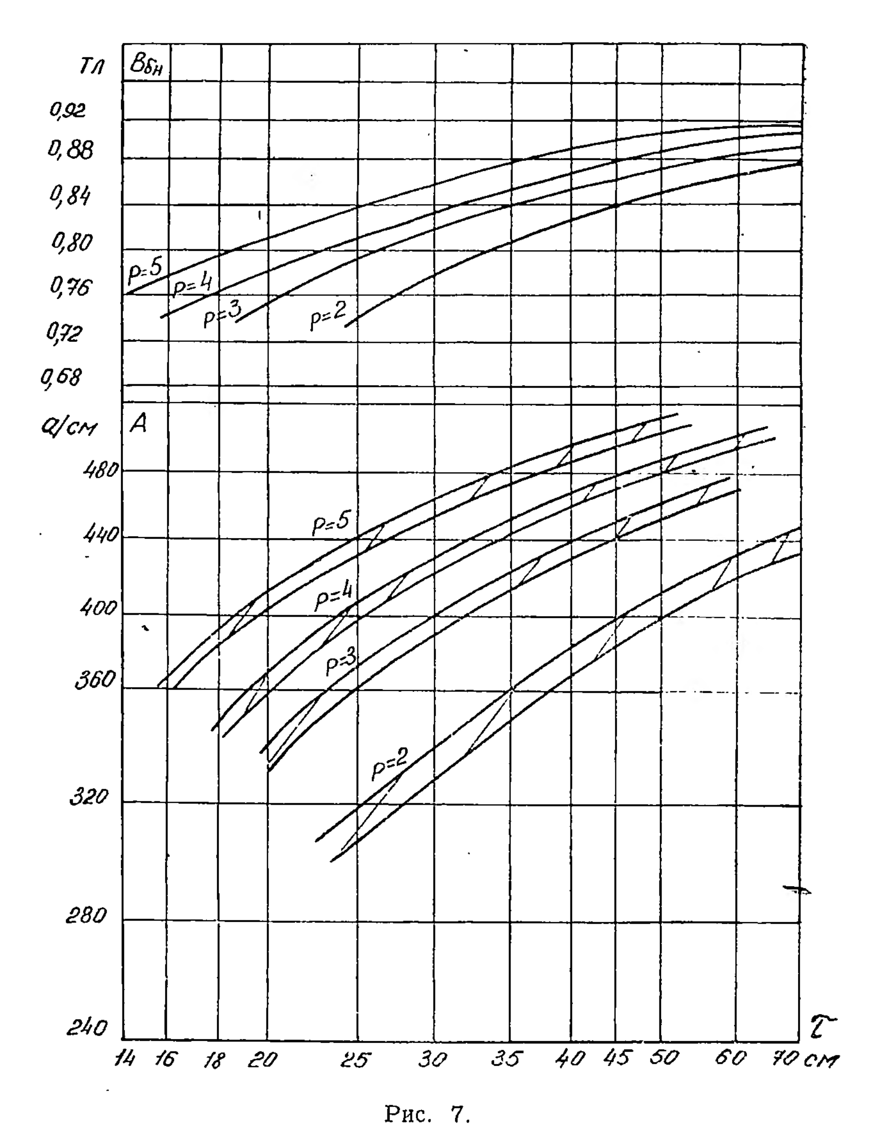


Рис. 7.

Большие значения $B_{\delta н}$ затрудняют выбор размеров паза и зубцов статора.

Подставив найденные величины, определим предварительно расчетную длину статора.

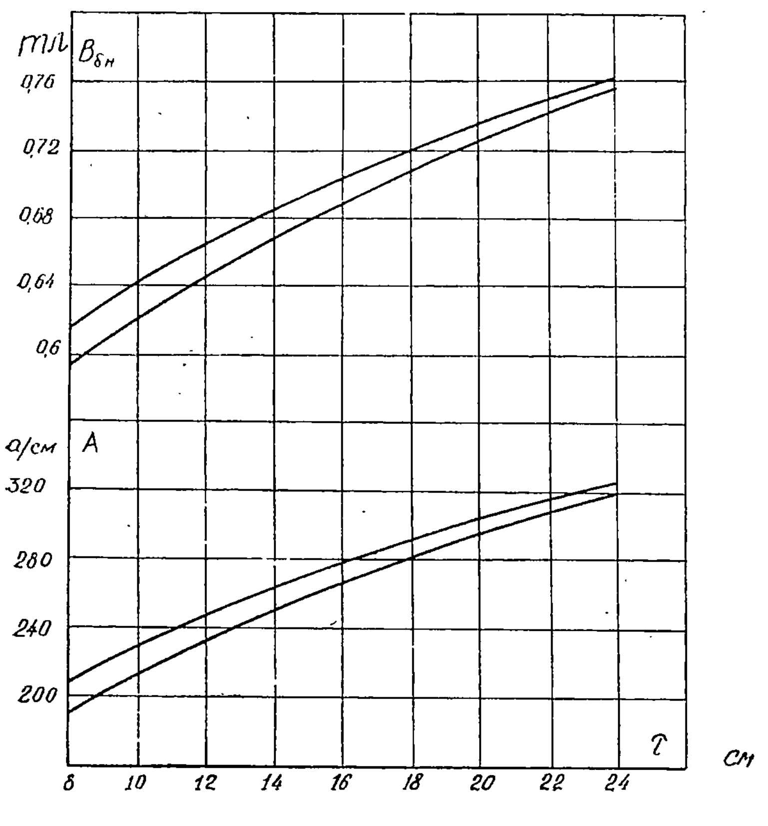


Рис. 8.

10. Действительная длина статора.

Предварительно действительную длину статора можно принять равной $l_1 \approx (1{,}05 \div 1{,}09)\, l_\delta$ *см.*

Статор собирают из пакетов (рис. 9) длиной 4,5—5,5 см, разделенных $n_в$ вентиляционными каналами шириной $b_в = 1$ *см* так, что длина всех пакетов статора

$$l = l_1 - n_в b_в \text{ см}$$

или при равных по ширине пакетах $l = (n_в \pm 1)\, l_{пак}$ см.

Ширина крайних пакетов может быть на 0,5—1,0 *см* больше ширины внутренних пакетов.

Окончательно расчетная длина статора $l_\delta = l_1 - 0{,}5 n_в b_в$ *см.*

Рис. 9.

Правильность выбранных размеров проверяют отношением $\lambda = \frac{l_\delta}{\tau}$, значение которого лежит в пределах, указанных на рис. 10.

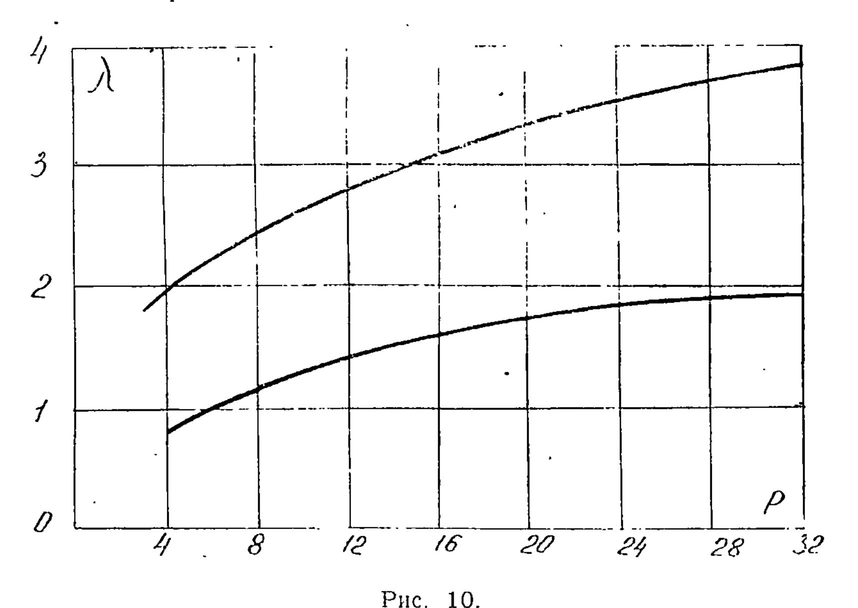


Рис. 10.

Обмотка, пазы и ярмо статора

11. Для нормальных машин 10—20-го габаритов применяют двухслойную петлевую обмотку при открытых пазах статора.

Число пазов на полюс зависит от полюсного деления и напряжения машины. Чем меньше полюсное деление и чем выше напряжение, тем меньше должно быть число пазов на полюс.

Для указанных машин пазовое деление t_1 лежит обычно в пределах $2{,}1 \leqslant t_1 \leqslant 4{,}6$ *см*; при этом ширина паза $b_{n1} = (0{,}48 \div 0{,}43)\,t_1$. Обычные значения ширины паза приведены в табл. 4.

Воспользовавшись табл. 4, можно предварительно определить

$$t_1, \quad Z_1 = \frac{\pi D}{t_1} \quad \text{и} \quad q = \frac{Z_1}{2pm}.$$

Для нормальных машин при $2p \leqslant 12$ обычно выбирают целое число пазов на полюс и фазу $q = 2 \div 6$. При большем числе полюсов рекомендуется брать $q = b + \frac{c}{d}$, где b, c и d — взаимно простые числа.

Значения дробного q можно брать из ряда табл. 18 так, чтобы $\frac{2p}{d}$ = целое число.

После выбора q окончательно определяем Z_1 и t_1.

12. Общее число пазов $Z_1 = 2pmq$.

13. Пазовое деление $t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}$ *см*.

14. Число эффектных проводников в пазу

$$u_{п1} = \frac{A t_1 a}{I_н};$$

где a — число параллельных ветвей. Предварительно $a = 1$. Значение $u_{п1}$ округлить до целого четного числа и уточнить при этом

$$A = \frac{u_{п1} I_н}{t_1 a} \ a/см.$$

15. Число витков фазы

$$w_1 = pqu_{п1}\frac{1}{a}.$$

16. Шаг обмотки и обмоточные коэффициенты.

Шаг двухслойной обмотки

$$y \approx 0{,}83\tau = 0{,}83\frac{Z_1}{2p} \ пазов.$$

Значение «y» округлить до целого числа и определить

$$\beta = \frac{y}{\tau}$$

Обмоточный коэффициент $k_о = k_р k_у$.

Коэффициент распределения

$$k_р = \frac{0{,}5}{q \sin\frac{30°}{q}} \ (\text{при } q = ц.\ ч.),$$

$$k_p = \frac{0,5}{N \sin \frac{30^\circ}{N}} \left(\text{при } q = \frac{N}{d} \right).$$

Коэффициент укорочения $k_y = \sin \beta\, 90^\circ$.

17. Магнитный поток в зазоре при холостом ходе ($U_н = E_0$)

$$\Phi_0 = \frac{U_н}{4k_B f w_1 k_{o1}} = C_1 E_0 \quad вб.$$

При номинальной нагрузке (предварительно)

$$\Phi_н = 1,08\Phi_0.$$

18. Индукция в зазоре

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_0\, 10^4}{\alpha_\delta\, \tau\, l_\delta} = C_2 \Phi_0 \quad тл,$$

$$B_{\delta н} = 1,03\, B_{\delta 0} \quad тл.$$

19. Размеры проводника, изоляции и паза статора. Сечение эффективного проводника

$$s_c' = \frac{I_н}{a\, \Delta_c} \quad мм^2,$$

где Δ_c — плотность тока, $а/мм^2$.

Для нормальных машин 10—13—20 габаритов $\Delta_c = 4 \div 5,7$ $а/мм^2$. Низшие значения для длинных машин при напряжении 6000—6300 *в*, высшие — для коротких машин при напряжении до 690 *в*.

Эффективный проводник нужно разбить на элементарные сечением $s_{эл}$ не более 18 $мм^2$.

Число элементарных проводников в одном эффективном

$$n_{эл} \approx \frac{s_c'}{s_{эл}} \quad \text{(округлить до четного числа)}.$$

Сечение $s_{эл} = a \times b$ выбрать (по табл. 11 приложения) так, чтобы можно было уложить в паз $n_{эл} u_{п1}$ проводников при выбранных ширине паза $b_{п1}$ и пазовой изоляции (табл. 15, 16, 17). По ширине паза обычно укладывается один или два элементарных проводника высотой *a* не более 2,63 *мм*.

Ширина паза может быть несколько изменена, но при этом индукция в наиболее узком сечении зубца не должна превышать значений, указанных в табл. 4а.

Глубина паза $h_{п1}$ и, следовательно, высота зубца опреде-

ляются после укладки в паз проводников, изоляции и клина. Обычно $h_{п1} \approx (3{,}8 \div 5{,}5)\ b_{п1}$ *см*.

Расположение проводников в пазу показано на рис. 11, 12.

Выполнить эскиз паза с заполнением и определить размеры: ширину паза $b_{п1}$ и высоту паза $h_{п1}$ (см. рис. 12).

20. Ширина коронки зуба

$$b_{z1} = t_1 - b_{п1} \ см.$$

21. Индукция в коронке зубца

$$B_{z1\,м} = \frac{B_{\delta н} t_1 l_\delta}{b_{z1} l k_c} \ тл, \ где \ k_c \approx 0{,}93.$$

22. Высота ярма статора

$$h_c = \frac{D_a - D}{2} - h_{п1} \ см.$$

23. Индукция в ярме статора

$$B_c = \frac{\Phi_н}{2 h_c l k_c} = c_4 \Phi \ тл,$$

при номинальном фазном напряжении

$$\Phi_н = \frac{k_E U_н}{4 k_Б f k_{01} w_1} \ вб.$$

Для машин 10—13-го габаритов применяется электротехническая сталь марки Э21 или Э31, для 14—20-го габаритов — сталь Э31.

24. Температурный перепад в пазовой изоляции

$$\Theta_и = \frac{\Delta_c A k_f}{4200} \frac{t_1}{2(b_{п1} + h_{п1} - h_к)} \frac{\delta_{п1}}{\lambda_и} \ ^\circ C,$$

где k_f — коэффициент, учитывающий потери в проводниках от вихревых токов, предварительно $k_f = 1{,}2$;

$\delta_{п1}$ — односторонняя толщина изоляции по ширине паза, *см*;

$\lambda_и$ — теплопроводность изоляции

($\lambda_и = 0{,}0016$ при компаундированной изоляции, при некомпаундированной — 0,0010).

Для обмоток с изоляцией класса В температурный перепад $\Theta_и$ не должен превышать 32—35° С.

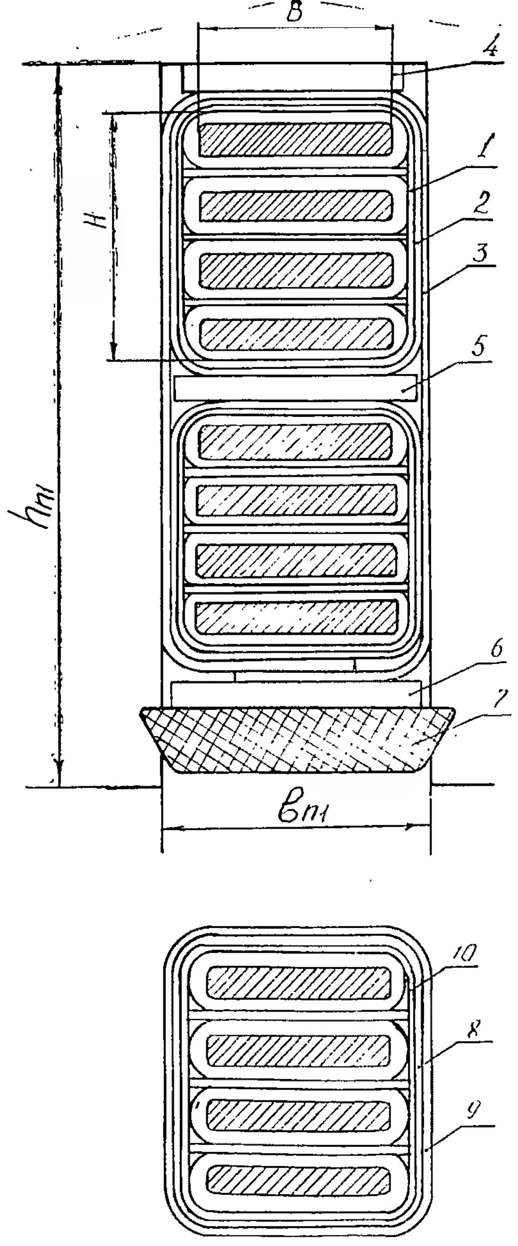


Рис. 11.

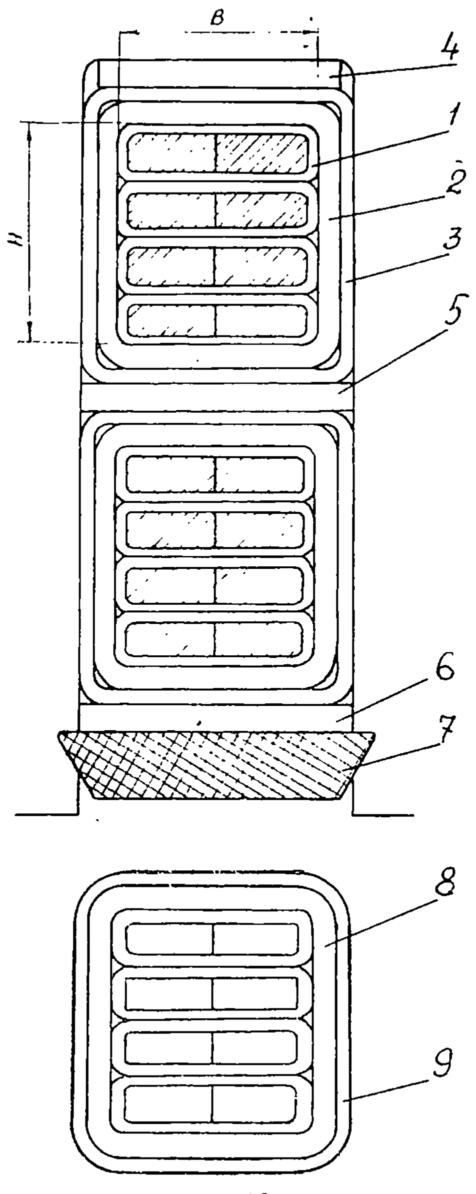


Рис. 12.

25. Градиент температуры в изоляции

$$\Delta\Theta_{п} = \frac{\Theta_{п}}{\delta_{п1}} \ ^{\circ}C/см .$$

При $U_{нл}=6300 \div 15750$ *в* градиент не должен быть больше 54—65° С/*см*.

При меньших напряжениях градиент можно довести до 80° *С/см*.

26. Длина лобовой части обмотки статора

$$l_{л1} = A + 1{,}57\,H + 2M + N \quad см.$$

Для определения А нужно рассчитать:

а) Среднюю ширину жесткой секции

$$\tau_{y} = \frac{\pi(D + 2H + a_{3})}{2p}\beta \ см ,$$

где Н определяется в зависимости от выбранного типа обмотки (рис. 13);

$$\beta = \frac{y_{1}}{3q} ;$$

$$a_{3} = 2(h_{2} + h_{3} + h_{4}); \quad h_{2}, \ h_{3}, \ h_{4} \text{ — по рис. 14.}$$

б) Расстояние t_c между осями двух соседних секционных сторон при выходе их из пазов, отсчитанное по дуге окружности диаметром $D+a_2$, где $a_2=2(h_3+h_4)$ *см*, равно:

$$t_{c} = \frac{\pi(D + a_{2})}{Z_{1}} \ см .$$

в) Расстояние f_c между осями соседних секционных сторон в отогнутых участках лобовых частей: $f_c=B+a_1$ *см*; $a_1=\Delta_1+\Delta_2$,

где Δ_1 — двусторонняя толщина изоляции секционной стороны лобовой части с учетом разбухания от пропитки или компаундирования;

Δ_2 — воздушный промежуток между лобовыми частями, необходимый для их охлаждения;

Δ_2=0,4, 0,5, 0,6 соответственно для напряжений 690, 3150 и 6300 *в*.

$$\text{Размер } A = \frac{\tau_{y} - R - 0{,}5\,H}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c}}{t_{c}}\right)^{2}}} \ см ,$$

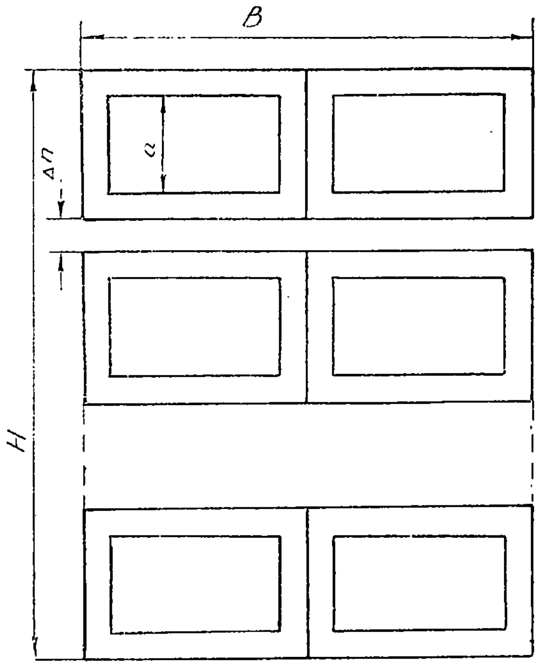


Рис. 13а.

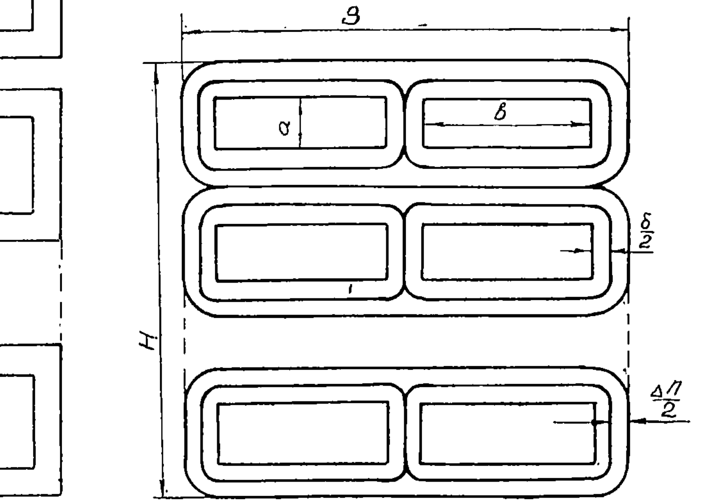


Рис. 13б.

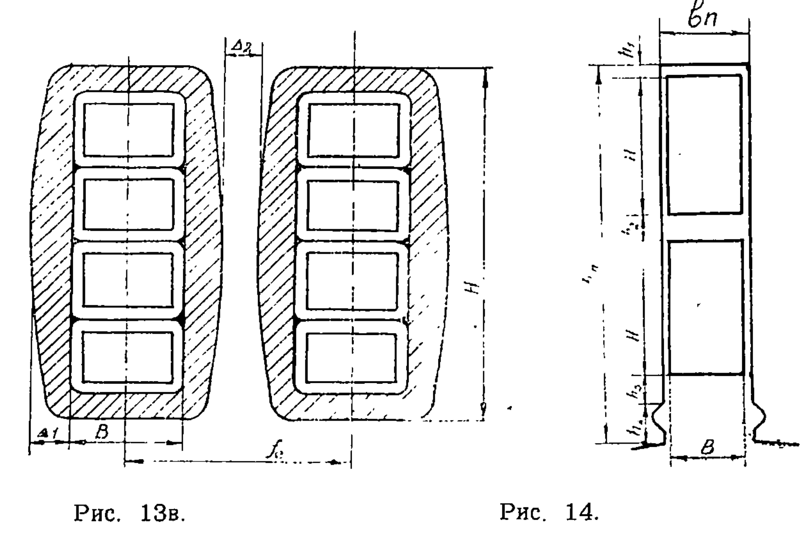


Рис. 13в.

Рис. 14.

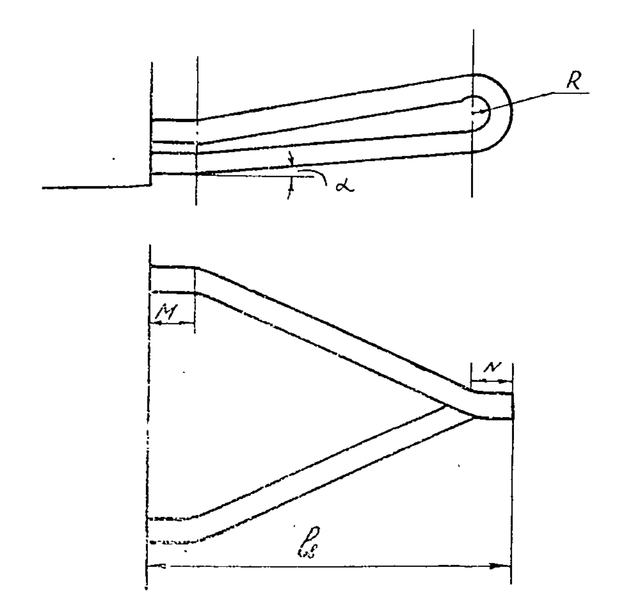


Рис. 15.

где R — радиус закругления головки лобовой части (R=1,2, 1,3, 1,5 для напряжений 690, 3150 и 6300 *в*).

Размеры N=6÷9,5 см;

M=2,5—6,5 см (рис. 15). Большие размеры для высших напряжений.

После подстановки найденных значений A, H, M и N определяется размер $l_{л1}$.

27. Длина вылета лобовой части

$$l_{в1} = 0{,}5\,A\frac{f_c}{t_c} + M + N \quad см.$$

Длина вылета со стороны междукатушечных и междугрупповых соединений

$$l_{в1}' = l_{в1} + 4B + (3 \div 6) \quad см.$$

28. Средняя длина полувитка обмотки статора

$$l_{ср} = l_1 + l_{л1} \quad см.$$

29. Общая длина проводников фазы обмотки

$$L_c = 2w_1 l_{ср}\,10^{-2} \quad м.$$

30. Омическое сопротивление фазы обмотки при 75° С

$$r_{a\,75} = \frac{1}{46}\frac{L_c}{s_c'} \quad \textit{ом},$$

где s_c' — сечение эффективного проводника, $мм^2$; L_c — в метрах.

В относительных единицах

$$\underline{r}_{a\,75} = \frac{I_н r_{a75}}{U_н} \quad \textit{д. е.}$$

31. Вес меди обмотки статора

$$G_{м1} = \gamma_м m L_c s_c 10^{-3} \ \textit{кг} \quad (\gamma_м = 8{,}9 \ \textit{кг/дм}^3).$$

Воздушный зазор

32. Длина воздушного зазора под серединой полюса

$$\delta \approx \frac{0{,}36\,A\,\tau}{k'(\underline{x}_d - x_\delta)B_{\delta 0}} \quad \textit{см},$$

где $k' \approx 1{,}04 \div 1{,}08$, учитывает зазоры между полюсными сердечниками и ярмом ротора;

$\underline{x}_\delta \approx 0{,}08 \div 0{,}18$ *д. е.* (с увеличением $P_н$ и $2p$ x_δ возрастает); $x_d \approx 1{,}3$ (в среднем), для двигателей с массивными полюсными наконечниками рекомендуется $x_d = 1{,}0 \div 1{,}2$.

Полюс и ярмо ротора

Полюсы явнополюсных машин обычно собирают из листов, выштампованных из стали ст. 3 толщиной 1—2 мм (чащие значения h_p:

33. Радиус дуги очертания полюсного наконечника (рис. 16)

$$R_p = \frac{D}{2 + \dfrac{8D(\delta_м - \delta)}{b_p^2}} \quad \textit{см},$$

где $\delta_м = 1{,}5\delta$; $\qquad b_p = \alpha_p \tau$ (п. 9).

34. Высота полюсного наконечника по оси полюса, при высоте его по краям $h_p' = 0{,}6$—$2{,}0$ *см*,

$$h_p = h_p' - R_p - \sqrt{R_p^2 - \left(\frac{b_p}{2}\right)^2} \quad \textit{см}.$$

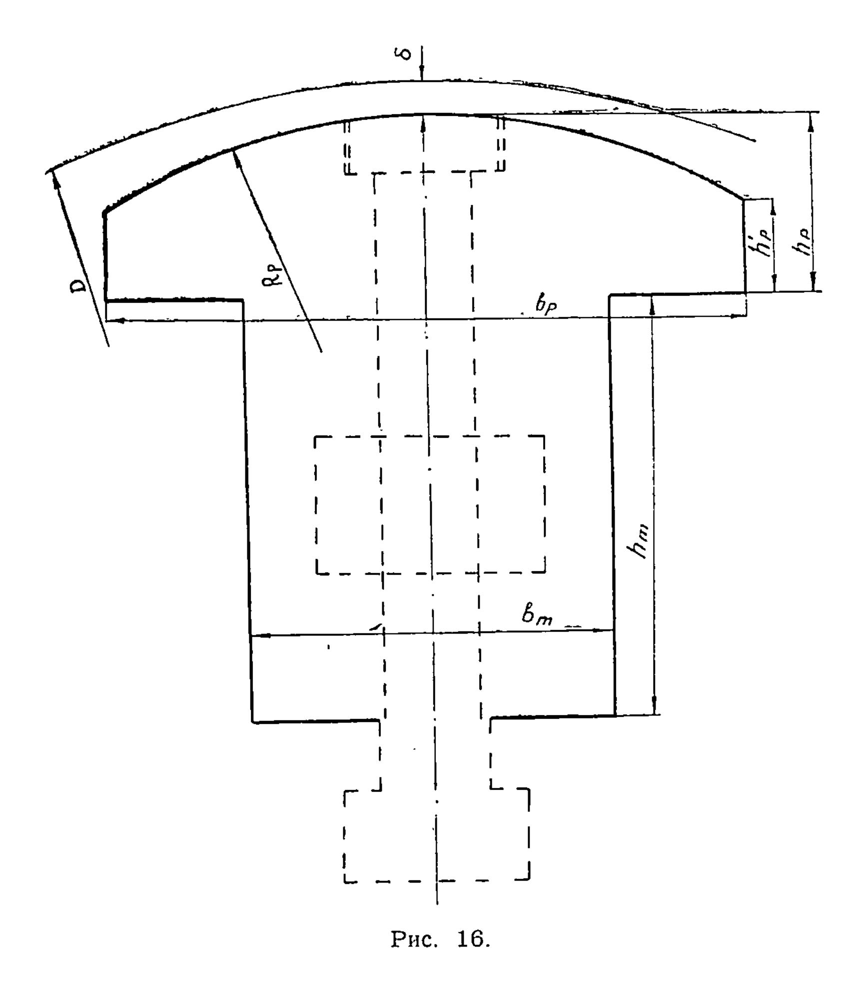


Рис. 16.

Для больших многополюсных машин при $\alpha_p = 0{,}7 \div 0{,}75$ и наличии успокоительной клетки можно принимать следующие значения h_p:

τ, *см*	30—50	50—60	60—75
h_p, *см*	4,5—5,5	5,5—6,5	6,5—8,5.

35. Высота полюсного сердечника для машин 10—15-го габаритов при однослойной обмотке возбуждения и $2p \geqslant 6$

$$h_m \approx 10{,}5\delta + 8 \text{ см}.$$

Для больших машин $h_m = 0{,}9\tau - 0{,}007\tau^2$ *см.*

Окончательно размер h_m может быть установлен после расчета обмотки возбуждения при помощи масштабного эскиза катушки и полюса.

36. Длина полюса по оси l_m для небольших машин принимается равной длине статора; для машин средней мощности $l_m = l_1 - (2 \div 3)$ *см*; для крупных машин $l_m = l_1 - (5 \div 10)$ *см.*

Ширина полюса b_m определяется по допустимой индукции в основании сердечника B_m:

$$b_m = \frac{\Phi_н \sigma_н \cdot 10^4}{k_c l_m B_m} \quad см,$$

здесь $\Phi_н$ — по п. 17;

$k_c = 0{,}97$ при толщине стали 1,5 *мм*; B_m — по табл. 4а.

Коэффициент полюсного рассеяния

$$\sigma_н = 1 + k_\delta \frac{35\,\delta}{\tau^2},$$

где k_δ зависит от h_p.

h_p, *см*	2	3	4	5	6	7
k_δ	5,5	7	8,5	10	11	12

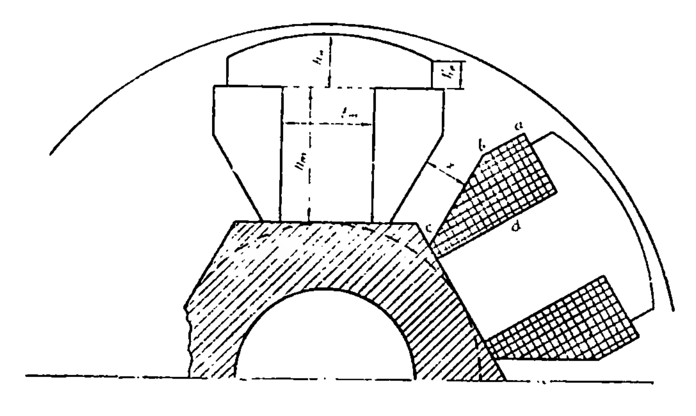


Рис. 17.

Ярмо (обод ротора) в зависимости от размеров и скорости вращения машины представляет собой одну из следующих конструкций.

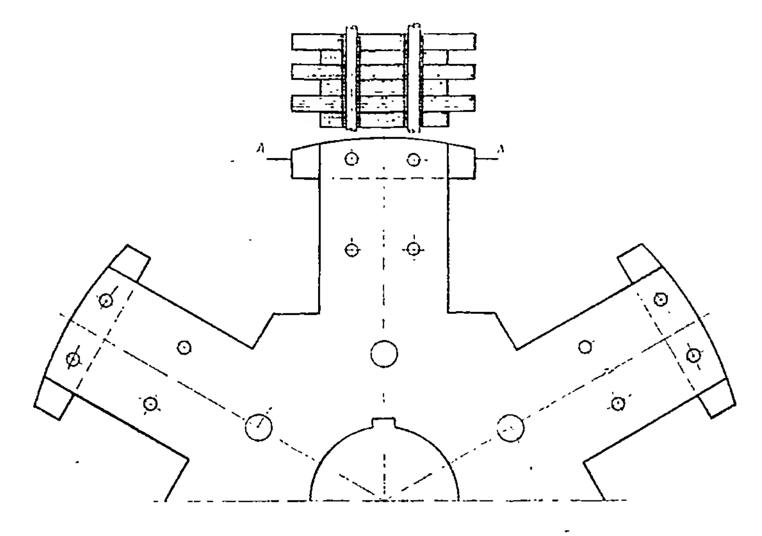


Рис. 17а.

1) В небольших и быстроходных машинах — массивную или собранную из листов втулку цилиндрической или 2р-гранной формы, непосредственно напрессованную на вал (рис. 17, 17а).

Диаметр вала предварительно можно взять равным 0,25D *см*.

2) В средних и тихоходных машинах — сварное или литое колесо со спицами (рис. 18).

Размеры поперечного сечения обода ротора $S_р = h_р l_{а2}$ часто определяются механической прочностью, поэтому индукция $B_р$ в сечении $S_р$ может быть занижена.

В тихоходных машинах сечение обода определяется по допустимой индукции.

При этом $l_{а2} = l_1 + (8 \div 15)$ *см*;

$$h_р = \frac{\Phi_н \sigma_н}{2 l_{а2} B_р} \text{ см}.$$

При расчете обмотки возбуждения окончательно устанавливаются размеры междуполюсного окна и размеры h_m, b_m, l_m, $l_{а2}$, $h_р$.

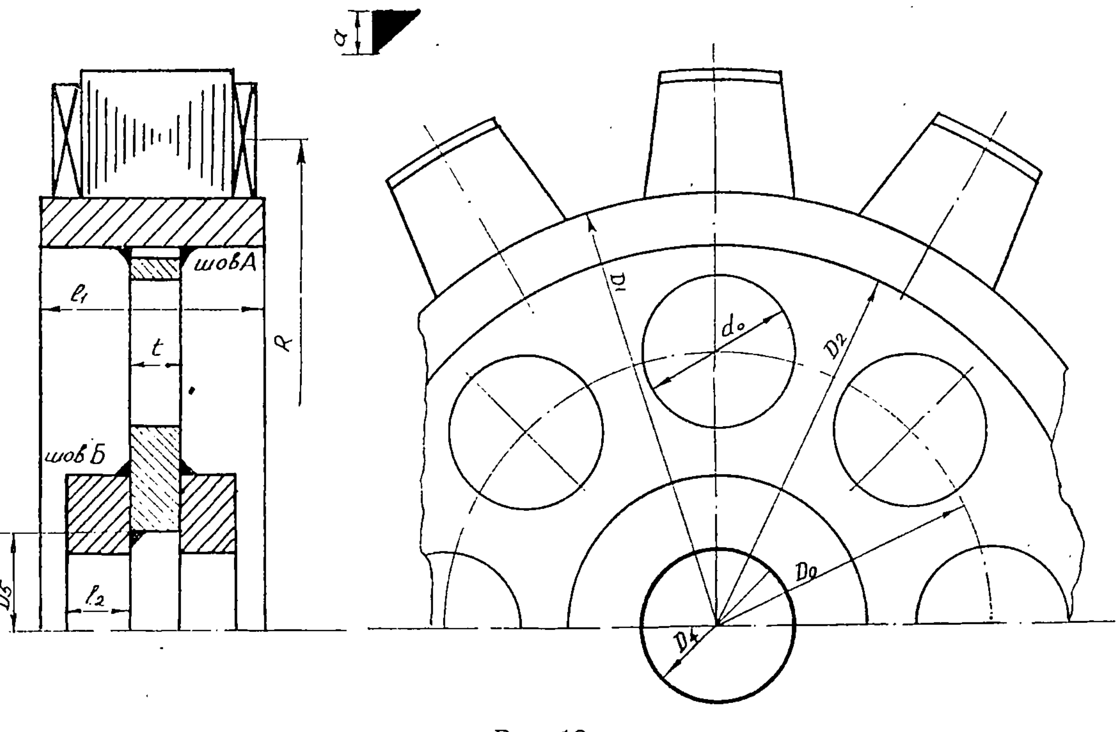


Рис. 18.

Успокоительная (пусковая) обмотка

37. Пазовое деление t_2 для уменьшения добавочных потерь в успокоительной клетке должно быть близким к пазовому делению статора t_1.

Если q целое число или

$$q = b + \frac{c}{d} = b + \frac{1}{2}, \text{ или } bd + c \leqslant 9,$$

то должно быть выполнено условие

$$0{,}8t_1 < t_2 < t_1.$$

38. Число стержней Q_y успокоительной обмотки на полюс можно определить из условия уменьшения амплитуд гармоник в кривой э. д. с. статора, обусловленных его зубчатостью:

$$(Q_y - 1)t_2 \approx \frac{6kq}{6q + 1} t_1,$$

где $k=1, 2, 3...$

39. Сечение стержня успокоительной обмотки

$$s_y = 0{,}4 \frac{3qu_{п1}n_{эл}s_c}{Q_y} \quad мм^2,$$

где $3qu_{п1}n_{эл}s_c$ — сечение проводников статорной обмотки, приходящихся на полюсное деление, $мм^2$.

40. Диаметр стержня

$$d_c = 1{,}13\sqrt{s_y} \quad мм.$$

Значение d_c выбрать кратным 0,5 *мм* в соответствии с нормальным сортаментом круглого цветного металла.

Выбранное число стержней на полюс Q_y должно соответствовать следующему условию:

$$Q_y \leqslant \frac{b_p - d_c - 2z}{t_2} + 1,$$

где z — номинальное допустимое расстояние от края полюсного наконечника до крайнего стержня; $z \geqslant 0{,}3 \div 0{,}7$ *см*.

Короткозамыкающие пластины, называемые сегментами успокоительной клетки (рис. 9), имеют следующие размеры:

$$a_к \approx 2d_c, \quad b_к \geqslant 0{,}7d_c \quad при \quad a_к \times b_к \approx 0{,}5Q_y s_y.$$

Размеры полосовой меди $a_к$ и $b_к$ выбирают по стандарту (табл. 14).

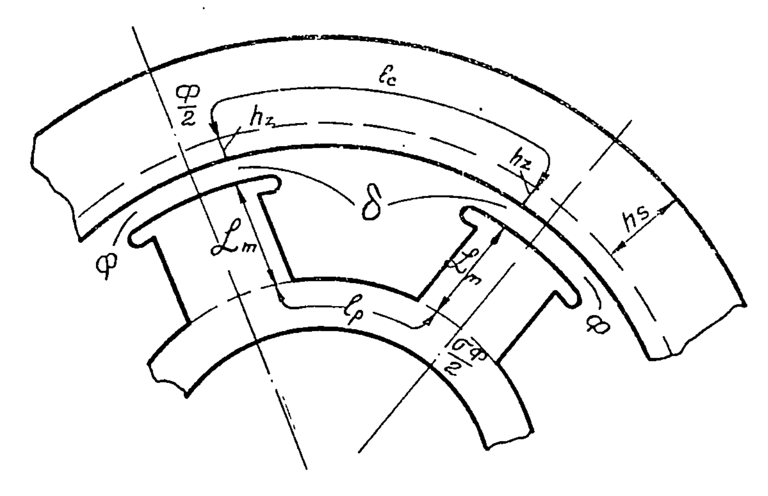


Рис. 19.

Концы сегментов соседних полюсов соединяют при помощи пластины. Площадь контакта должна составлять около семи-десяти сечений сегмента.

41. Диаметр круглой части паза $d_1 \approx d_c + 0{,}2$ *мм.*

Размеры верхней части: $b_ш = 3$ *мм*; $h_ш = 2 \div 3$ *мм.*

42. Длина стержней между сегментами: $l_c = l + 0{,}07$ *см.*

Расчет магнитной цепи. Расчет выполнить для $E_o = U_н$ (магнитная цепь на рис. 19). $\Phi = C_1 E_0$ *вб*; $B_\delta = C_2 \Phi_{тл}$ (по п. п. 17 и 18).

43. Коэффициент воздушного зазора с учетом зубчатости статора и ротора

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}.$$

Для статора

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta}.$$

Для ротора

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \delta},$$

где

$$\gamma_{1(2)} = \frac{\left(\frac{b_{ш1(2)}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{ш1(2)}}{\delta}}.$$

Здесь $b_{ш1(2)}$ — ширина открытия паза статора (ротора), при открытых пазах равная ширине $b_п$.

44. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 1{,}6\, k_\delta B_\delta 10^4 = C_5 B_\delta \quad a.$$

45. Магнитное напряжение зубцов статора. Индукция в сечении зубца на 1/3 высоты его от наименьшего сечения

$$B_{z1/3} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{k_c l b_{z1/3}} = C_3 \Phi \quad тл,$$

здесь

$$b_{z1/3} = t_{1/3} - b_{п1} \quad см,$$

$$t_{1/3} = \frac{\pi\left(D + \frac{2}{3} h_{п1}\right)}{Z} \quad см.$$

По табл. 5, 6 находим

$$H_{z1/3} \quad а/см \quad и \quad F_{z1} = 2h_{п1} H_{z1/3} \quad a.$$

46. Магнитное напряжение ярма статора.

Индукция в ярме статора

$$B_c = \frac{\alpha_\delta \tau l_\delta}{2h_c l k_c} B_\delta = C_4 \Phi \quad тл.$$

Средняя длина магнитных линий в ярме статора

$$l_c = \frac{\pi (D_a - h_c)}{2p} \quad см.$$

Значению B_c соответствует H_c, *а/см* (табл. 5, 6). Магнитное напряжение ярма статора на два полюса:

$$F_c = \zeta H_c l_c \quad a,$$

где коэффициент ζ (по рис. 20) учитывает неравномерность распределения индукции вдоль длины статора.

Суммарное магнитное напряжение статора

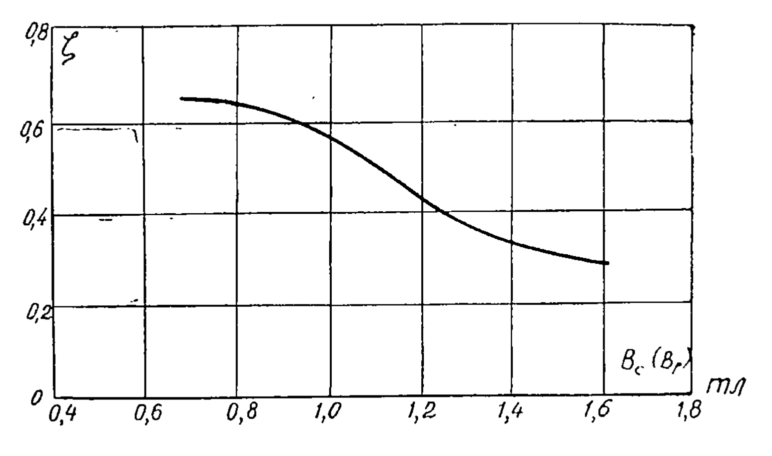


Рис. 20.

$$F_1 = F_\delta + F_{z1} + F_c \quad a .$$

47. Магнитное напряжение полюсов.

Через полюс проходит магнитный поток

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma ,$$

где Φ_σ — поток рассеяния полюсов,

$$\Phi_\sigma = 2(F_\delta + F_z + F_c)(\lambda_p + \lambda_m) = C_6 F_1 ,$$

где λ_p — проводимость между внутренними и внешними поверхностями полюсных наконечников (рис. 21);

$$\lambda_p = \frac{l_p h_{pm}}{0{,}8 a_p} + 2h_{pm} \lg\left(1 + \frac{\pi}{2}\frac{b_p}{a_p}\right);$$

$$h_{pm} = \frac{2h_p + h_p'}{3} ;$$

λ_m — эквивалентная проводимость между внутренними и внешними поверхностями полюсных сердечников,

$$\lambda_m = \frac{1}{2}\frac{l_m b_m}{0{,}8\, a_m} + h_m \lg\left(1 - \frac{\pi}{2}\frac{b_m}{a_m}\right).$$

Коэффицнент рассеяния

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi} .$$

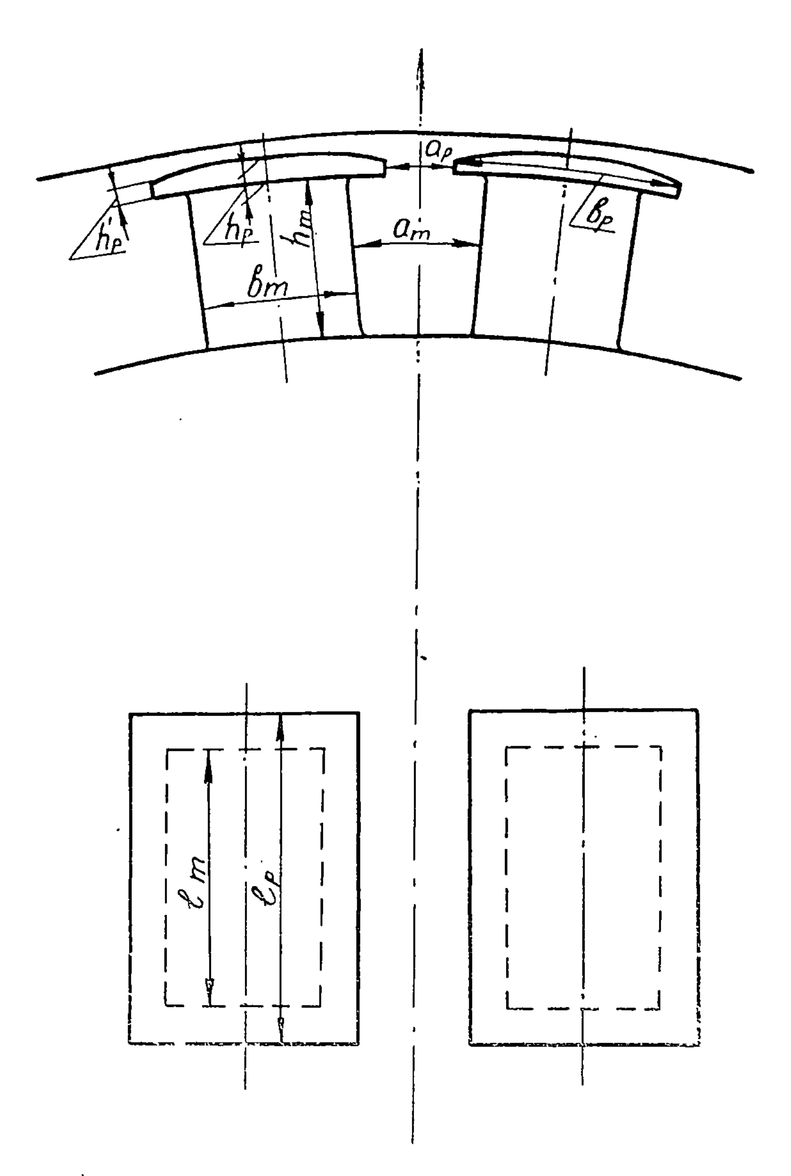


Рис. 21.

Для явнополюсных машин $\sigma = 1,1 \div 1,25$.

Расчетная индукция полюса

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} 10^4 = C_7 \Phi_m \quad \text{тл},$$

где S_m — активное сечение полюсного сердечника,

$$S_m = k_c b_m l_m \quad \text{см}^2,$$

здесь b_m и l_m — ширина и длина полюсного сердечника;

k_c — коэффициент заполнения сталью. При полюсах, собранных из листов, $k_c = 0,95—0,97$.

Магнитное напряжение на пару полюсов

$$F_m = 2 L_m H_m \; a \; (H_m = f(B_m) \text{ табл. 7}), \; L_m - \text{по рис. 19}.$$

48. Магнитное напряжение ярма ротора.

Индукция в ярме ротора

$$B_p \approx \frac{\Phi}{2 l_{ap} h_p'} = C_8 \Phi \quad \text{тл},$$

где h'_p — высота ярма ротора с учетом вала.

$$F_p = H_p l_p \; a; \quad H_p = f(B_p)$$

(по табл. 5, 6, 8);

l_p — определяется по эскизу (рис. 19).

49. Магнитное напряжение зазоров в стыках между полюсами и ярмом.

Суммарный зазор в стыках при стальном ярме $\delta_{ст} = 0,012 \div 0,03$ *см*; при чугунном ярме $\delta_{ст} = 0,018 \div 0,045$ *см*.

$$F_{\delta m} = 1,6 \, \delta_{ст} B_m 10^4 = C_9 B_m \quad a.$$

50. Намагничивающая сила (на пару полюсов) при холостом ходе.

$$F_{в0} = F_\delta + F_z + F_c + F_m + F_p + F_{\delta m}.$$

51. Характеристика холостого хода.

Расчет магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи повторить для нескольких значений E_0 и Φ_0.

При $E_0 = U_н$ принять $E_0 = 1$ и $\Phi_0 = 1$.

Результаты расчета записать в табл. 23.

По данным таблицы построить характеристику холостого хода и сравнить ее с универсальной.

$I_в$, *д. е.*	0	0,5	1	1,5	2	3	3,5
E_0, *д. е.*	0	0,58	1	1,21	1,33	1,46	1,51

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

Для определения индуктивного сопротивления рассеяния необходимо рассчитать коэффициенты магнитной проводимости поля рассеяния.

52. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при прямоугольных открытых пазах (рис. 22а)

$$\lambda_{п} = \frac{h_1 - h_4}{3b_{п}} k_{\beta} + \frac{h_2'}{b_{п}} k_{\beta}' + \frac{h_4}{4b_{п}},$$

где k_{β} и k'_{β} — коэффициенты, учитывающие уменьшение потокосцепления за счет укорочения шага обмотки. Значения их определяются по кривым (рис. 23).

53. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д1} = 0{,}9 \frac{t_1 (q k_{01})^2 k_{ш1}}{\delta\, k_{\delta}} \sigma_{д1},$$

где $k_{ш}$ — коэффициент (зависит от отношения открытия паза к зазору и пазовому делению).

$$k_{ш1(2)} = 1 - 0{,}033 \frac{b^2_{ш1(2)}}{t_{1(2)}\, \delta}.$$

Значения $\sigma_{д1}$ — коэффициента дифференциального рассеяния определяют по табл. 18 и 19.

54. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей

$$\lambda_{л1} = 0{,}34 \frac{q}{l_{\delta}'} (l_{л1} - 0{,}64 \beta_1 \tau).$$

55. Индуктивное сопротивление рассеяния

$$x_{\sigma} = 0{,}158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}'}{pq} \sum \lambda \quad ом.$$

$$\sum \lambda = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}.$$

В относительных единицах

$$x_{\sigma} = \frac{I_{н}}{U_{н}} x_{\sigma} \quad о.\ е.$$

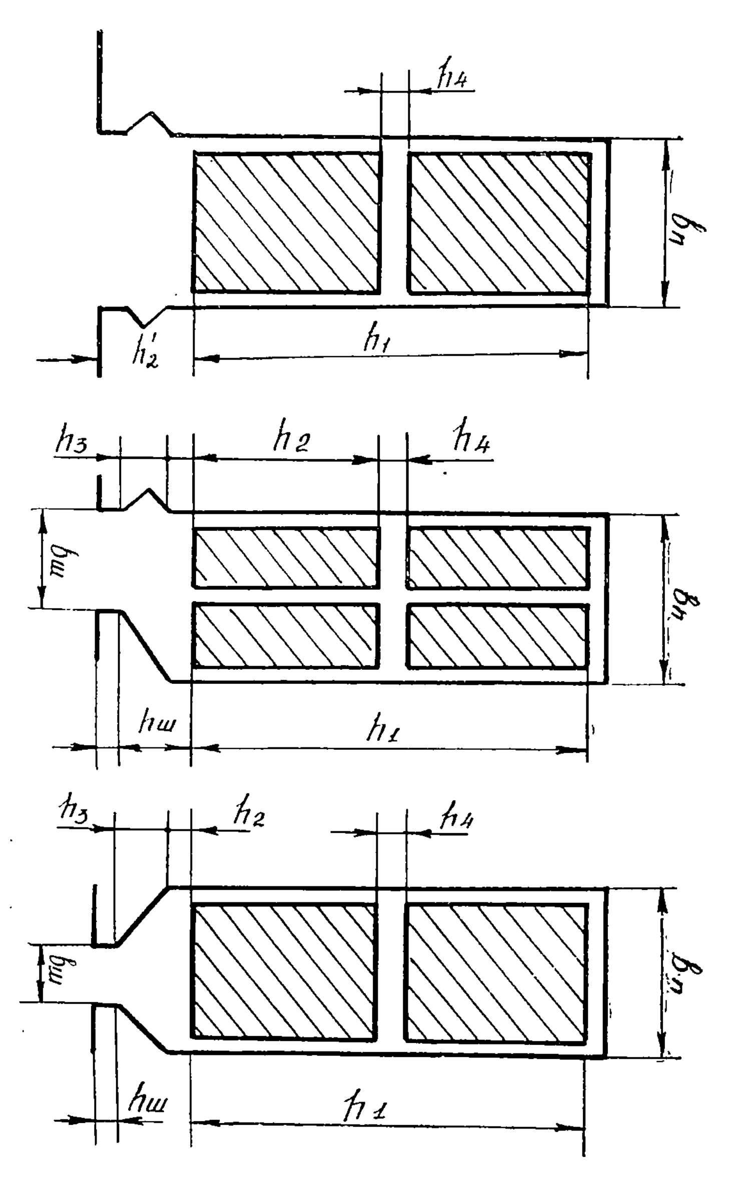


Рис. 22а.

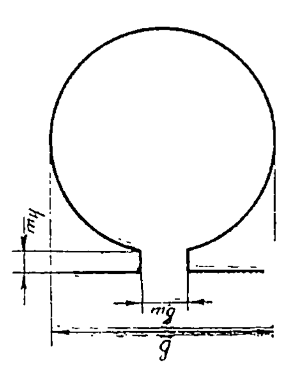


Рис. 22б.

Рис. 23.

Намагничивающая сила обмотки возбуждения при нагрузке

56. Для определения $F_{вн}$ воспользуемся диаграммой Потье при допущении $r_a \approx 0$.

Построим х. х. х. в долях единиц и проведем векторы $U_н$ и $I_н$ под углом $\varphi_н$ (рис. 24).

Примем $U_н = 1$ и $I_н = 1$. К $U_н$ прибавим $jI_н x_р$, где $x_р \approx \approx (1{,}15 \div 1{,}3) x_s$ — расчетное индуктивное сопротивление.

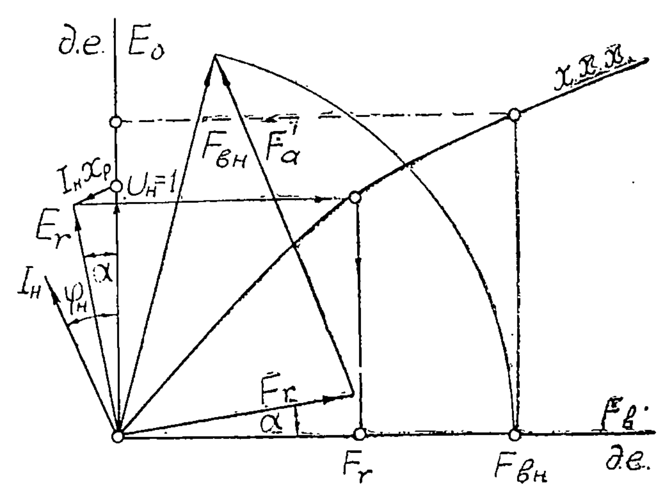


Рис. 24.

Для $E_r = U_н + jI_н x_р$ по х. х. х. определим результирующую н. с. F_r.

Проведем вектор F_r перпендикулярно E_r и параллельно вектору $\bar{I}_н$—$F'_a = k_{ad} F_a$ *д. е.*

F_a — н. с. реакции якоря при номинальной нагрузке на пару полюсов.

$$F_a = 0{,}9\, m \frac{w_1 k_{01}}{p} I_н \quad a;$$

k_{ad} — коэффициент приведения н. с. якоря к н. с. обмотки возбуждения. Определяется он по кривым (рис. 32).

В относительных единицах

$$\underline{F}_a = \frac{F_a}{F_{в0}} \; д. \; е.,$$

где $F_{во}$ — по п. 74.

Н. с. обмотки возбуждения при нагрузке будет $F_{вн}$ *д. е.*

Обмотка возбуждения и возбудитель

57. Напряжения $U_в$ возбудителя обычно равны 230, 115, 100, 80, 50, 35 или 23 *в*. Напряжение на кольцах $U'_в$ на 1—3 *в* меньше.

Для небольших машин при применении для возбуждения полупроводниковых выпрямителей можно взять $U'_в < 24$ *в*.

58. Сечение проводника обмотки возбуждения (предварительно)

$$s_в = 1{,}15 \frac{\rho_t F_{вн} l_{в.ср.}}{U_в'} \quad мм^2 .$$

Здесь ρ_t — удельное сопротивление меди при рабочей температуре обмотки $t°$ С. Для многослойной обмотки из изолированного медного провода

при изоляции класса А $\rho_{100} = 0{,}0236$;

при изоляции класса В $\rho_{120} = 0{,}025$.

При однослойной обмотке из голой полосовой меди и изоляции класса В $\rho_{130} = 0{,}0256$.

Коэффициент 1,15 учитывает запас.

Среднюю длину витка $l_{в.ср}$ для машин мощностью меньше 100 *квт* можно предварительно определить по формуле

$$l_{в.ср} = [2(l_m + b_m) + (6 \div 10)]\, 10^{-2} \; м,$$

где l_m и b_m в *см*.

Ток возбуждения $I_в = s_в \Delta_в$ *а*,

где $\Delta_в = 1{,}8 \div 2{,}7$ *а/мм²* — допускаемая плотность тока.

По таблицам приложения выбрать стандартный провод размером $d/d_{из}$ или $a \times b/a_{из} \times b_{из}$ (ПЭЛБО или ПБД при классе изоляции А или ПСД — при классе изоляции В).

Для небольших машин при $2p \leqslant 8$ рекомендуется обмотка из изолированного проводника прямоугольного сечения. По технологическим условиям сечение проводника при прямоугольных полюсных сердечниках должно быть не более 30—40 *мм²*, причем отношение сторон проводника $b : a$ рекомендуется в пределах 1,5—2.

При $s_в \leqslant 5 \div 6$ *мм²* следует взять более низкое напряжение, так как при $s_в = 5$—6 *мм²* ухудшается заполнение объема катушки медью и ее теплоотдача.

59. Число витков обмотки возбуждения

$$w_в = \frac{F_{вн}}{2 I_в} .$$

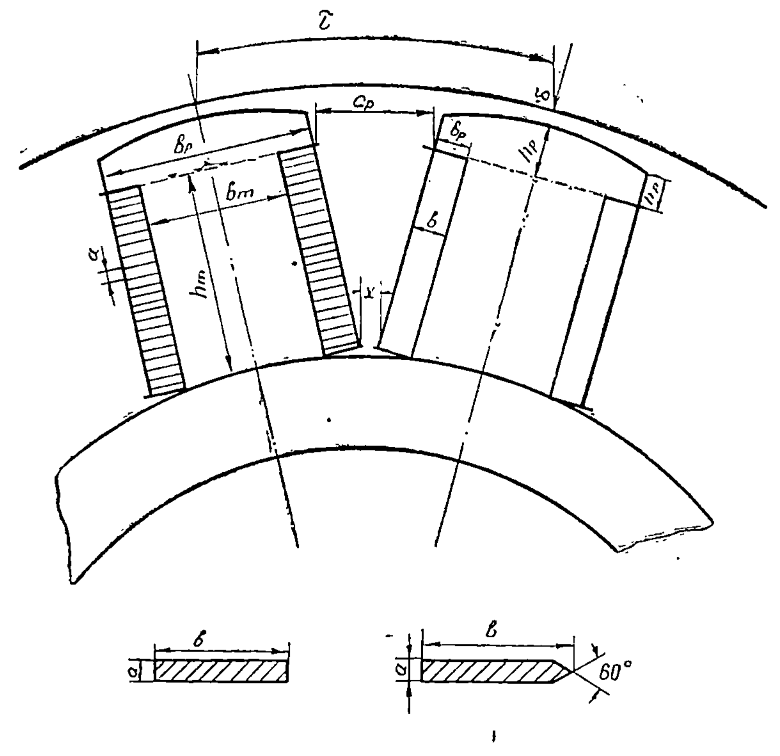


Рис. 25.

Определение размеров катушки и точных размеров h_m и $l_{в.\,ср}$ произвести по масштабному эскизу (рис. 17, 25).

Размер x — расстояние между катушками в нижней части — должен быть не менее 1,4—1,8 *см.*

60. Превышение температуры обмотки возбуждения

$$\Theta_в = \frac{\left(2{,}8 + \frac{l_1}{\tau}\right) F_{вн}\,\Delta_в}{76\,\Pi_в\,(1{,}6 + \sqrt{v})}\left[1 + \frac{\delta_{ип}\,(m - 0{,}5)(1{,}6 + \sqrt{v})}{2{,}8 + \frac{l_1}{\tau}}\right] {}^\circ C,$$

$\Pi_в$ — боковой периметр катушки *abc, см;*

$\delta_{ип}$ — двусторонняя изоляция проводника, *см;*

m — число слоев в катушке в широкой ее части (*db*);

V — окружная скорость ротора, *м/сек.*

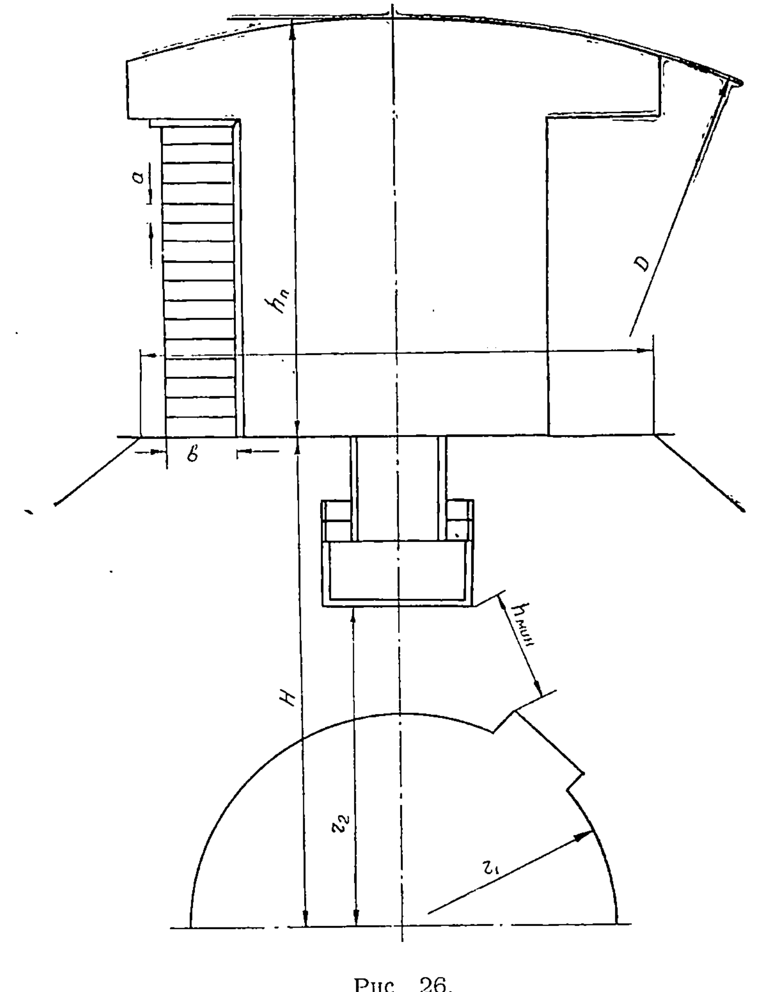


Рис. 26.

Если $\Theta_в$ окажется более 60° С при изоляции класса А или более 80° С при изоляции класса В, то необходимо изменить размеры проводника.

Для машин $P_н \geqslant 100$ *квт* обмотка возбуждения выполняется однослойной из проводника в виде полосовой меди, намотанной на ребро (рис. 26).

61. Ширина проводника

$$b = 5\left[\frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - 2h_m)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2\cdot 01 - x\right] \text{ мм},$$

где $\delta_1 = 0{,}2 \div 0{,}3$ *см* — толщина изоляции между катушкой и сердечником полюса;

0,1 *см* — воздушный промежуток между катушкой и сердечником полюса;

$$x \geqslant \frac{0{,}01\, l_1 \tau}{h_m} + 1{,}3 \quad \text{см}.$$

По стандарту (таблицы приложения) взять ширину проводника *b*, близкую к полученной, и высоту его *a* так, чтобы $a \times b \approx s_в$ по п. 58.

Длина витка обмотки возбуждения (при установленных предварительно l_m и b_m)

$$l_{в.ср} = 2(l_m + b_m - 2r) + \pi(2r + 2\delta_1 + 0{,}1b) \text{ см}.$$

При двухрадиусной катушке (рис. 27), когда $b_m > 20$ *см*, r не менее $0{,}1b$ *см*.

При однорадиусной катушке (рис. 28)

$$l_{в.ср} = 2(l_m - 2b') + \pi(b_m + 2\delta_1 + 0{,}1b) \quad \text{см},$$

где b' в зависимости от b_m

b_m, *см*	6	10	10,1—12	12,1—15	15,1—20
b', *см*	1,0	1,25	1,5	2,0	3,0

При кованых щеках $l_{в.ср}$ можно определить по рис. 29.

62. Плотность тока

$$\Delta_в = 20\sqrt{\frac{\Theta_в \alpha k}{b}} \quad a/мм^2,$$

где α и k определяют по кривым (рис. 30);

Θ — превышение температуры обмотки возбуждения (принять равным 80° *C*).

Ток возбуждения $I_в = \Delta_в s_в\ a$

($s_в$ — сечение проводника, выбранного по стандарту).

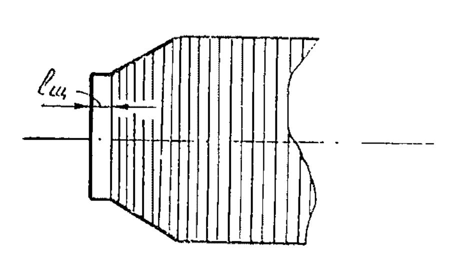
Если сечение проводника по п. 58 получится меньше 35—40 *мм*², то следует перейти к низшим напряжениям.

63 Число витков на полюс — по п. 59.

64. Размеры катушки и высота полюсного сердечника (рис. 31). Высота катушки $h_{кат} = 0{,}1(a + \Delta_{пр})(\omega_в + 1)$ *см*,

Рис. 27.

Рис. 28.



$l_ш$

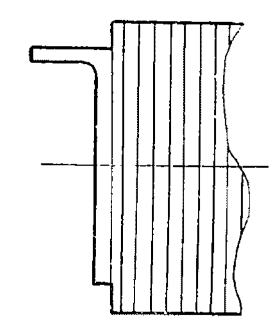


Рис. 29.

вт/см²град
α
0,024
0,022
0,020
0,018
0,016
0,014
0,012
0,010
0,008
0,006
0,004
0,002
0
10
20
30
40
50
60
70
м/сек
v_p
Аксиальная вентиляция
Радиальная вентиляция
α
K'
1,3
1,1
0,9
0,7
0,5
0
1
2
3
4
τ
$K=\left(\frac{\tau_1}{\tau}\right)^{-0,4}$

Рис. 30.

где $\Delta_{пр}$ — толщина изоляционной прокладки между витками. При опрессовании катушки толщина прокладки уменьшается до 0,3 *мм*.

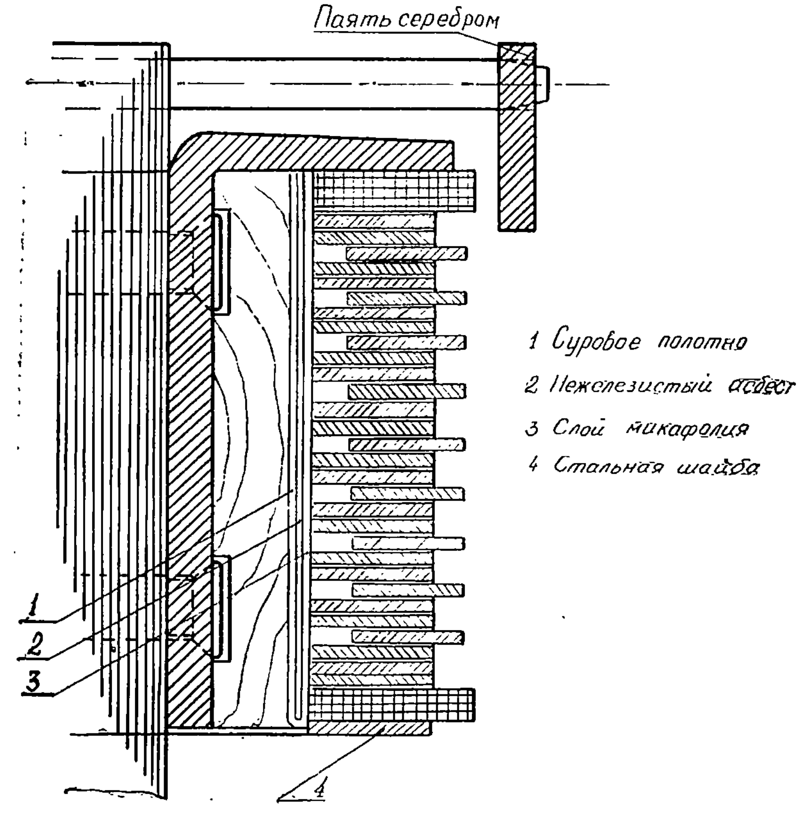


Рис. 31.

Высота сердечника полюса

$$h_m = h_{кат} + t_{и1} + t_{и2} + t_c + 0{,}2 \text{ см},$$

где $t_{и1}$ и $t_{и2}$ — верхняя и нижняя шайбы из изоляционного материала (табл. 20);

0,2 *см* — для учета возможных плюсовых допусков меди, изоляции и т. п.

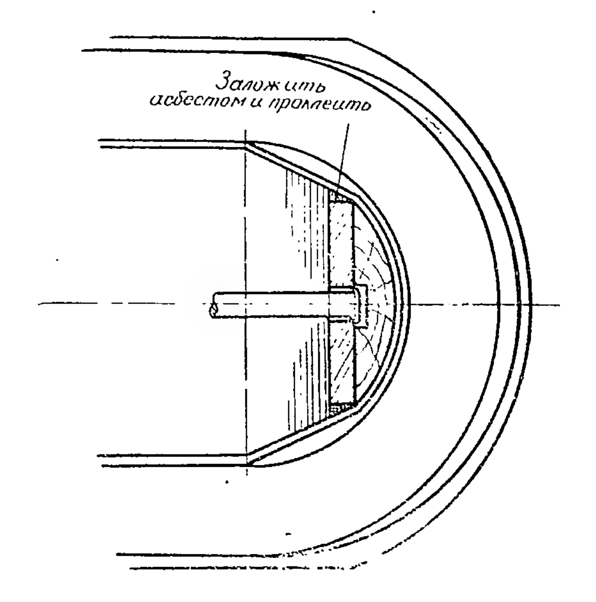


Рис. 31а.

65. Ток возбуждения, плотность тока, превышение температуры:

$$I_{вн} = \quad a; \ \Delta_в = \quad a/мм^2; \ \Theta_в = \quad C.$$

66. Общая длина всех витков обмотки возбуждения

$$L_в = 2p w_в l_{в.ср} 10^{-2} \ м.$$

67. Вес меди обмотки возбуждения

$$G_{мв} = \gamma_м L_в s_в 10^{-3} \ кг,$$

где $\gamma_м = 8{,}9$ *кг/дм*^{3} — удельный вес меди; вес меди на 1 *ква*

$$\frac{G_{мв}}{S_н} \ кг/ква.$$

68. Омическое сопротивление обмотки возбуждения

$$r_{в\,120} = \frac{\rho_t L_в}{S_в} \ ом.$$

При 80+40=120° С $\rho_{120} = 0{,}025$;

$$r_{в\,75} = r_{в\,120} \frac{40}{48} \ ом.$$

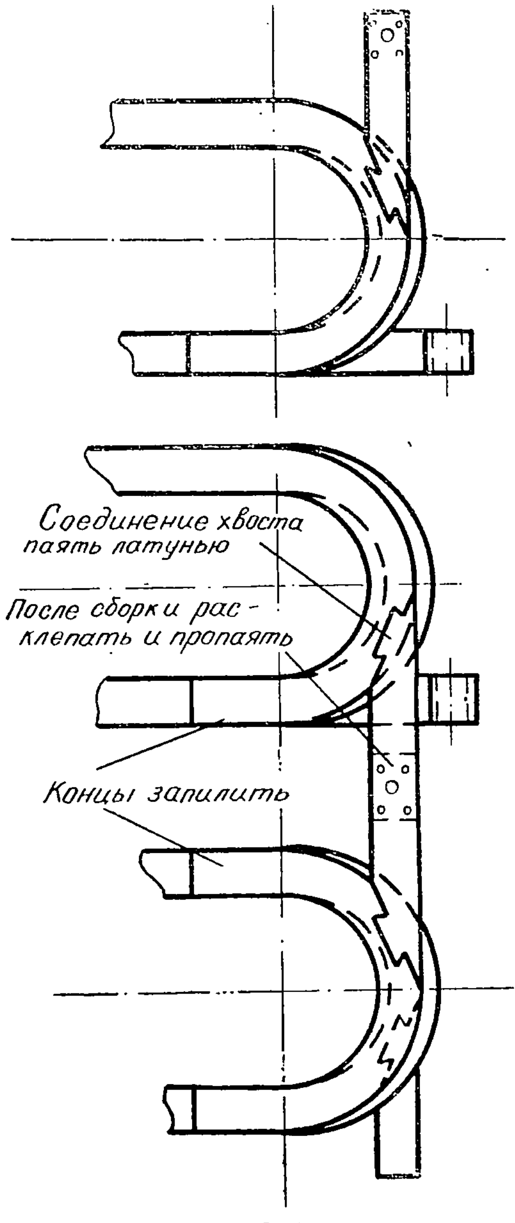

Соединение хвоста
паять латунью
После сборки рас-
клепать и пропаять
Концы запилить

Рис. 31б.

69. Максимальный ток возбуждения

$$I_{вм} = \frac{U_в'}{r_{в120}} \quad a.$$

70. Коэффициент запаса возбуждения $\frac{I_{вм}}{I_{вн}}$.

71. Номинальная мощность возбудителя

$$P_{вн} = U_в I_{вм} 10^{-3} \quad квт.$$

Параметры и постоянные времени машины

72. Индуктивные сопротивления взаимной индукции по продольной оси

$$x_{ad} = \frac{k_{ad} F_a}{F'_{\delta 0}} \; о. е.,$$

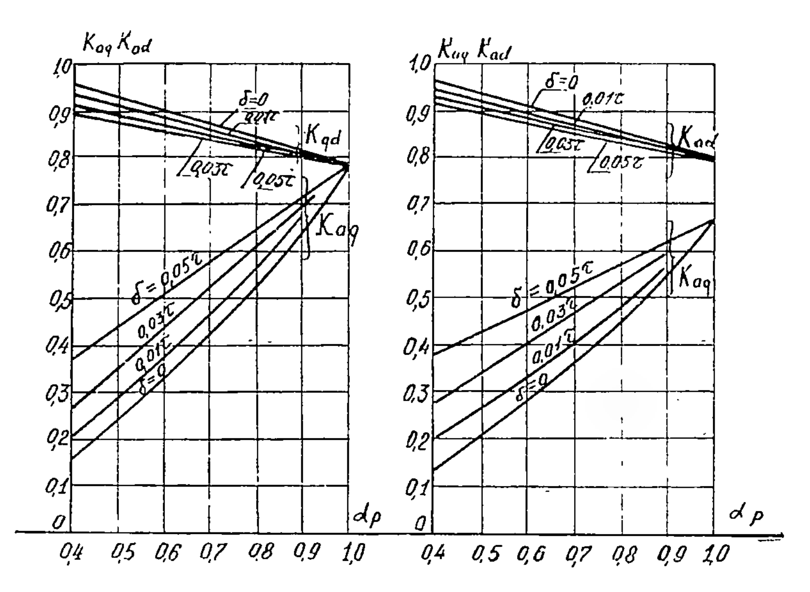


Рис. 32.

(здесь и в дальнейшем черточка, обозначающая относительные единицы, опускается)

k_{ad} и F_a — по п. 56,

$F_{\delta 0}' = (1{,}05 - 1{,}12)\, F_{\delta 0}$ с учетом зазоров между полюсами и ярмом ротора;

по поперечной оси

$$x_{aq} = \frac{k_{aq} F_a}{F_{\delta 0}} \cdot \frac{1 + k_\delta}{2} \quad д.\ е.,$$

где k_{aq} — по рис. 32.

73. Синхронные индуктивные сопротивления:

по продольной оси $x_d = x_\sigma + x_{ad}$ д. е.;

по поперечной оси $x_q = x_\sigma + x_{aq}$ д. е.

74. Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$x_в = 1{,}27 k_{ad}\, x_{ad} \left(1 + \frac{2 F_{\delta 0} l_m \sum \lambda}{\Phi_0\, 10^8} \right) \quad д.\ е.$$

$$\sum \lambda = \lambda_p l + \frac{\lambda_m l}{1{,}53} + \frac{\lambda_{mb}}{2{,}65}.$$

Здесь $\lambda_p l = 1{,}4 \left(\frac{d_t}{c_p} - 0{,}25 \right) + 0{,}55 \left(\frac{a_p}{c_p} + 0{,}2 \right) -$

$$- 0{,}4 \left(\frac{a_p}{c_p} - 0{,}5 \right)^2 \text{ (см. рис. 21,25);}$$

$$\lambda_{ml} = \frac{0{,}55\, h_m}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p} (h_m + 2 h_p + 2\delta)};$$

$$\lambda_{mb} = 0{,}37 \frac{b_m}{l_m}.$$

Здесь:

$$a_p = \frac{b_p - b_m}{2}; \quad c_p = \tau - b_p - \frac{2\pi d_t}{2p};$$

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{2D}.$$

Все размеры — в сантиметрах.

75. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{в э} = x_в - x_{ad} \ \partial.е.$$

76. Индуктивное сопротивление успокоительной (пусковой) клетки по продольной оси

$$x_{yэd} = 3{,}9 \frac{F_a}{\Phi_0} \cdot \frac{10^{-8}}{1 - k_y} \Lambda_{yэd} \ \partial.е.;$$

по поперечной оси

$$x_{yэq} = 3{,}9 \frac{F_a}{\Phi_0} \cdot \frac{1}{1 + k_y} \Lambda_{yэq} \ \partial.\ е.;$$

Здесь:

$$k_y = \frac{\sin Q_y \alpha_y}{Q_y \sin \alpha_y}; \quad \alpha_y = \frac{\pi}{\tau} t_2;$$

$$\Lambda_{yэd} = \frac{l_p}{Q_y} (\lambda_{п \cdot y} + \lambda_{д.y}) + \Lambda_{лd};$$

$$\Lambda_{yэq} = \frac{l_p}{Q_y} (\lambda_{п.y} + \lambda_{д.y}) + \Lambda_{лq},$$

где l_p — длина полюсного наконечника, *см*;

$$\lambda_{п.y} = \left(0{,}785 - \frac{b_ш}{2d_1}\right) + \frac{h_ш}{b_ш} \quad (\text{по рис. 22б});$$

$$\lambda_{д.y} \approx \frac{t_2}{16{,}5\,\delta};$$

$$\Lambda_{л.d} \approx 0{,}19 \frac{\tau C_d}{Q_y}; \quad \Lambda_{л.q} \approx 0{,}19 \frac{\tau C_q}{Q_y}.$$

Значения C_d и C_q — из кривых по рис. 30.

77. Активное сопротивление успокоительной клетки: по продольной оси

$$r_{y.d} = \frac{108}{f} \frac{F_a}{\Phi_0} \cdot \frac{10^{-6}}{1 - k_y} \left(\frac{C_c l_c}{Q_y s_y} + \frac{C_к \tau C_d}{Q_y s_к}\right) \ \partial.\ е.;$$

по поперечной оси

$$r_{y.q} = \frac{108}{f} \cdot \frac{F_a}{\Phi_0} \cdot \frac{10^{-6}}{1 + k_y} \left(\frac{C_c l_c}{Q_y s_y} + \frac{c_к \tau C_q}{Q_y s_к}\right) \ \partial.е.$$

$C_c = 1$ для медных стержней,
$C_c = 4$ для латунных,
$C_к$ — тоже для короткозамыкающих сегментов,
l_c — длина стержня, см,
s_y и $s_к$ — сечения стержня и сегмента, $мм^2$;
C_d и C_q — по рис. 33.

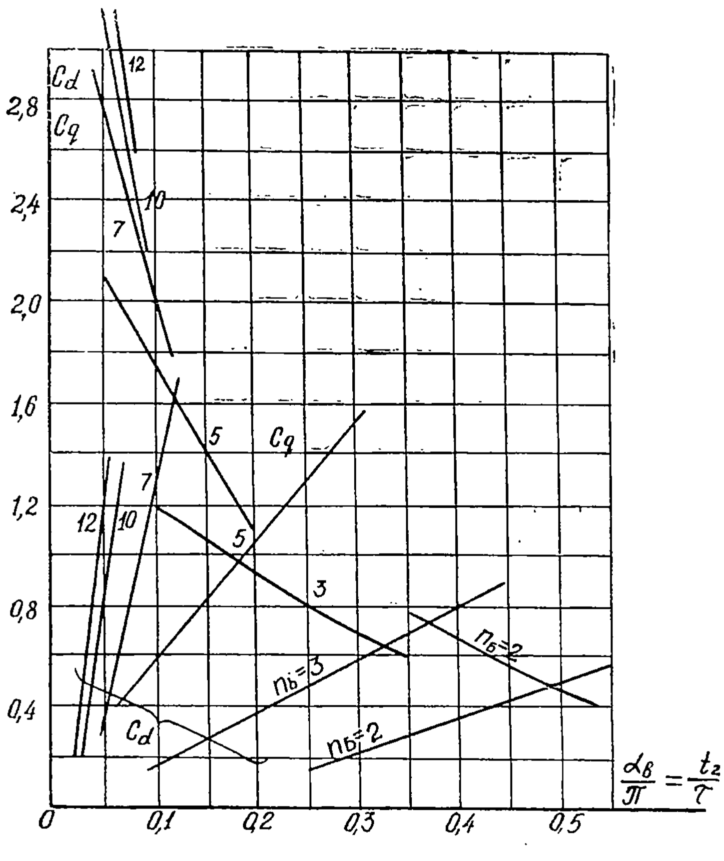


Рис. 33.

78. Переходное индуктивное сопротивление:
по продольной оси

$$x'_d = x_э + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{вэ}}\right)^{-1} \text{ о. е.};$$

по поперечной оси $x'_q \approx x_q$, *д. е.*

79. Сверхпереходное индуктивное сопротивление:

по продольной оси

$$x_d'' = x_\sigma + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{в\sigma}} + \frac{1}{x_{y\sigma d}}\right)^{-1} \quad д.\ е.,$$

по поперечной оси

$$x_q'' = x_\sigma + \frac{x_{aq}\, x_{y\sigma q}}{x_{aq} + x_{y\sigma q}} \quad д.\ е.$$

80. Индуктивное сопротивление обратной последовательности

$$x_2 = \sqrt{x_d'' x_q''} \quad д.\ е.$$

81. Постоянные времени обмотки возбуждения: при разомкнутых обмотках статора и успокоительной

$$T_{d0} = \frac{x_в}{\omega\, r_в} \quad сек;$$

при короткозамкнутой обмотке статора

$$T'_d = \frac{x'_d}{x_d}\, T_{d0} \quad сек.$$

82. Постоянная времени успокоительной клетки по продольной оси

$$T_{d0}'' = \frac{x_{ad}x_{в\sigma} + x_{ad}x_{y\sigma d} + x_{в\sigma}x_{y\sigma d}}{\omega r_{yd}(x_{в\sigma} + x_{ad})} \quad сек.$$

83. Постоянная времени успокоительной клетки по продольной оси при короткозамкнутых обмотках возбуждения и статора

$$T_d'' = \frac{x_d''}{x_d'}\, T_{d0}'' \quad сек.$$

84. Постоянная времени обмотки статора при короткозамкнутых обмотках ротора

$$T_a = \frac{x_2}{\omega\, r_a} \quad сек.$$

85. Кратность тока короткого замыкания при возбуждении холостого хода (ОКЗ)

$$f_{к0} = ОКЗ = \frac{E_0'}{x_d'} \ (x_d' \ \partial.\ e.,\ E_0' \ \partial.\ e. -$$

по рис. 34).

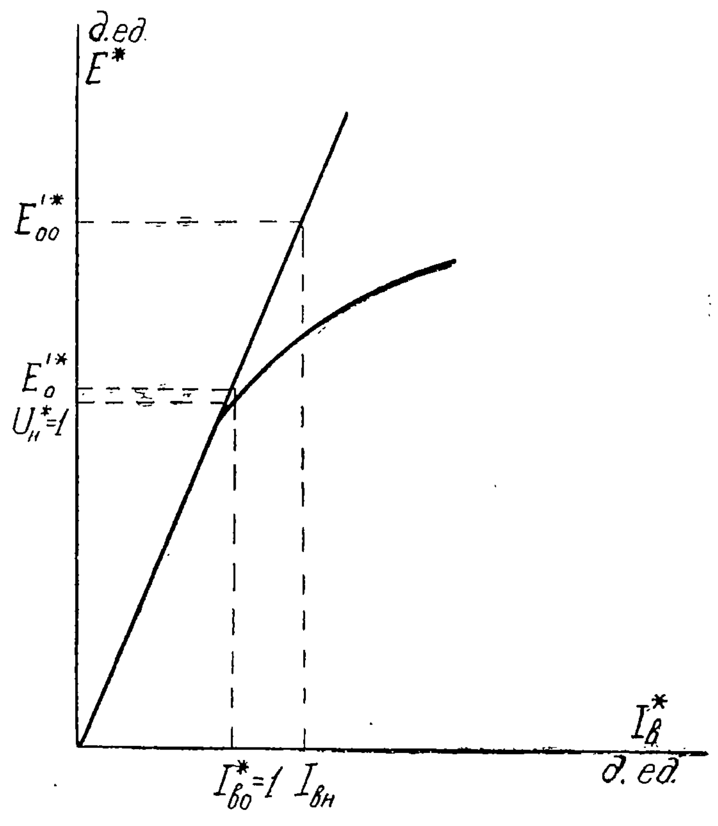


Рис. 34.

86. Кратность тока короткого замыкания при номинальном возбуждении:

$$f_{кн} = f_{ко}\ I_{в.н},$$

$$I_{вн} = F_{вн}\ \partial.\ e. \quad \text{(по рис. 24)}.$$

87. Ударный ток короткого замыкания

$$i_{уд} = 1{,}8 \frac{1{,}05\sqrt{2}}{x_d''} \ \partial.\ e.$$

88. Статическая перегружаемость

$$K = \frac{f_{кн}}{\cos\varphi_н}\ k$$

(k — по рис. 35).

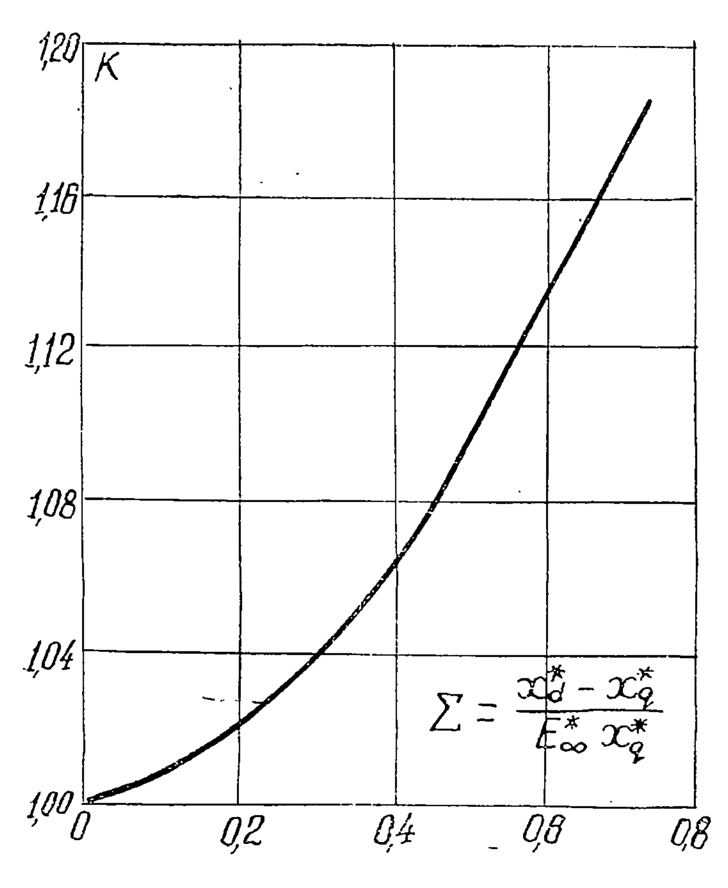


Рис. 35.

Потери к. п. д.

89. Потери мощности в стали ярма статора при холостом ходе

$$P_{c\cdot c} = k_д p_{c.c} G_c 10^{-3} \textit{ квт},$$

где $k_д = 1{,}6$ при $P_н \leqslant 250$ *квт*;
$k_д = 1{,}3$ при $P_н > 250$ *квт* (учитывает дефекты при обработке).

Удельные потери в стали (по табл. 9):

Вес ярма статора $G_c = S_c l_c 2p\gamma_c 10^{-3}$ *кг*.

Здесь сечение ярма $S_c = h_c l k_c$ *см²*;
удельный вес стали $\gamma_c = 7{,}65$ *кг/дм³*.

90. Потери мощности в стали зубцов статора

$$P_{cz} = k_{дz} p_{cz} G_z 10^{-3} \textit{ квт},$$

где $k_{дz} = 1{,}8$ при $P_н \leqslant 250$ *квт*;
$k_{дz} = 1{,}7$ при $P_н > 250$ *квт*;

p_{cz} — удельные потери в стали зубцов по табл. 9. Вес стали зубцов

$$G_z = Z b_{z\,cp} h_{п1} l k_c \gamma_c 10^{-3} \textit{ кг}.$$

91. Поверхностные потери в полюсных наконечниках.

В явнополюсных машинах поверхностные потери в полюсных наконечниках вызываются колебаниями поля в их поверхностном слое из-за наличия пазов на статоре.

Амплитуда колебаний индукции $B_0 = \beta_0 k_\delta B_\delta$ *тл*, β_0 — по рис. 36.

Среднее значение удельных поверхностных потерь, отнесенных к 1 *м²* поверхности полюсного наконечника

$$p_{пов} = K_0 \left(\frac{Zn}{10000}\right)^{1,5} (10 B_0 t_1) \textit{ вт/м}^2;$$

K_0 — по табл. 21;

Z — число пазов статора, n — скорость вращения ротора, *об/мин*;

t_1 — зубцовое деление статора, *см*.

Поверхностные потери всех полюсных наконечников

$$P_{пов} = 0{,}6 \cdot 2p \tau \alpha_p l_p p_{пов} 10^{-7} \textit{ квт}.$$

Здесь:

l_p — длина полюсного наконечника, *см*;

τ — полюсное деление, *см*.

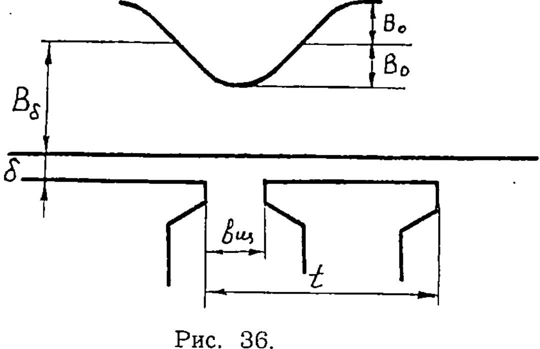


Рис. 36.

92. Механические потери

$$P_{мех} = 0{,}8 \cdot 2p\left(\frac{v}{40}\right)^3 \sqrt{\frac{l_1}{19}}\ квт,$$

где v — окружная скорость ротора, *м/сек* (при $f=50$ *гц* v *м/сек* ≈ τ*см*);

l_1 — полная длина статора, *см*.

93. Электрические потери в обмотке статора (основные)

$$P_{э1} = mI_н^2 r_{a75} 10^{-3} \text{ квт}.$$

94. Добавочные потери при номинальной нагрузке

$$P_{доб} \approx 0{,}005 P_н \text{ квт}.$$

95. Потери на возбуждение при номинальной нагрузке

$$P_в = \frac{I_{вн}^2 r_{в75} + 2\Delta U_щ I_{вн}}{\eta_в} 10^{-3} \text{ квт},$$

$\Delta U_щ = 1$ *в* для угольных и графитных щеток;
$\Delta U_щ = 0{,}3$ *в* для металлоугольных и металлографитных;
к. п. д. возбудителя $\eta_в \approx 0{,}75 \div 0{,}9$,

если возбудитель насажен на один вал с синхронной машиной.

96. Общие потери при номинальной нагрузке

$$\sum P = P_{с.с} + P_{с.z} + P_{пов} + P_{мех} + P_{э1} + P_{доб} + P_в \text{ квт}.$$

97. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum P}{P_{1н}}\right) 100\%,$$

где $P_{1н}$ — активная мощность, подводимая к двигателю при номинальной нагрузке, *квт*.

Превышения температуры

Перепад температуры в пазовой изоляции — по п. 24.

98. Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха

$$\Theta_a = \frac{q_c}{\alpha(1 + 0{,}01v)} \ {}^\circ C,$$

где значения α зависят от полюсного деления:

$$\alpha = 1{,}33 \cdot 10^{-3} \text{ вт/град}\cdot\text{см}^2 \text{ при } \tau < 40 \text{ см};$$

$$\alpha = 1{,}0 \cdot 10^{-3} \text{ вт/град}\cdot\text{см}^2 \text{ при } 40 < \tau \leqslant 60 \text{ см};$$

$$\alpha = 0{,}66 \cdot 10^{-3} \text{ вт/град}\cdot\text{см}^2 \text{ при } \tau > 60 \text{ см};$$

v — окружная скорость ротора, *м/сек*.

Удельный тепловой поток, приходящийся на 1 *см*^{2} охлаждаемой поверхности статора

$$q_c = \frac{A\Delta}{\gamma_\vartheta} + \frac{P_{c1} + 0{,}5\,P_{дсб}}{\pi D\, l_1} \ вт/см^2.$$

Здесь: P_{c1} — суммарные потери в стали статора (по п.п. 89 и 90);

$\vartheta\gamma = 4200 \ \frac{см}{ом \cdot мм^2}$ — удельная электропроводимость нагретой меди;

A — линейная нагрузка обмотки статора, *а/см;*
Δ — плотность тока в статорной обмотке, *мм*[2];
D — внутренний диаметр статора, *см.*

99. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки над температурой охлаждающего воздуха

$$\Theta_л = \frac{q_л}{\alpha_\vartheta} \ ^\circ C,$$

где удельный тепловой поток внешней поверхности лобовых частей

$$q_л = \frac{1{,}4\,A\Delta}{\gamma_\vartheta} \ вт/см^2;$$

$$\alpha_\vartheta = 3 \cdot 10^{-3}(1 + 0{,}1\,v).$$

100. Среднее превышение температуры обмотки статора

$$\Theta_c = (\Theta_н + \Theta_a) l_1 + (\Theta_н + \Theta_л) l_л \ ^\circ C.$$

101. Среднее превышение температуры обмотки возбуждения — по 61а.

Пусковые характеристики

Пусковые свойства синхронных двигателей характеризуют начальный пусковой момент $M_{нач}$ (при $s = 1$) и входной момент $M_{вх}$ (при $s = 0{,}05$), а также начальный пусковой ток $I_{нач}$.

Пусковые характеристики представляют собой зависимость $\frac{M}{M_н}$ и $\frac{I}{I_н}$ от скольжения.

Для расчета пусковых характеристик необходимы параметры: x_{ad}, x_{aq}, x_σ, $r'_в = r_в(1+k)$ ($k = 8 \div 10$ — кратность увеличения добавочного сопротивления обмотки возбуждения при пуске):

$$x_{в\sigma},\ x_{y\sigma d},\ r_{yd},\ r_{yq},\ x_{y\sigma q}.$$

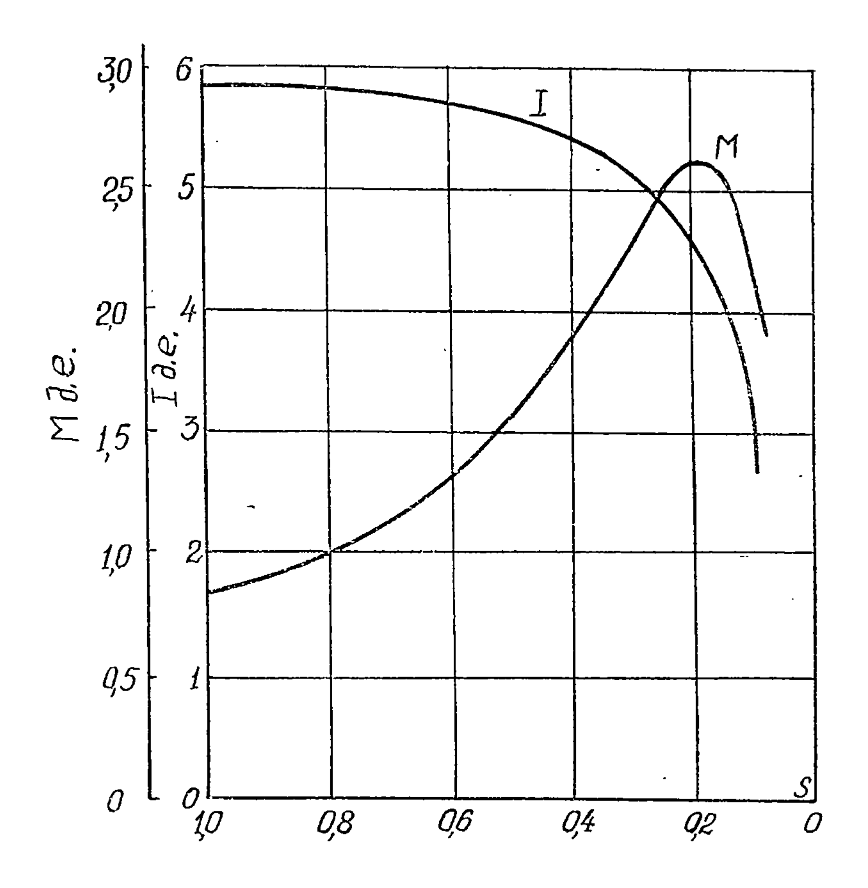


Рис. 37.

Расчетные формулы приведены в табл. 21. Расчет выполнить для $s = 1{,}0$; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05. Результаты расчета записать в табл. 22 и построить кривые, аналогичные рис. 37.

II. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ

1. Устройство роторов

Синхронные двигатели серии СДН имеют две конструкции в зависимости от скорости вращения. Для тихоходных машин всех габаритов со скоростями вращения 100—500 *об/мин* применяется конструкция с привернутыми к обо-

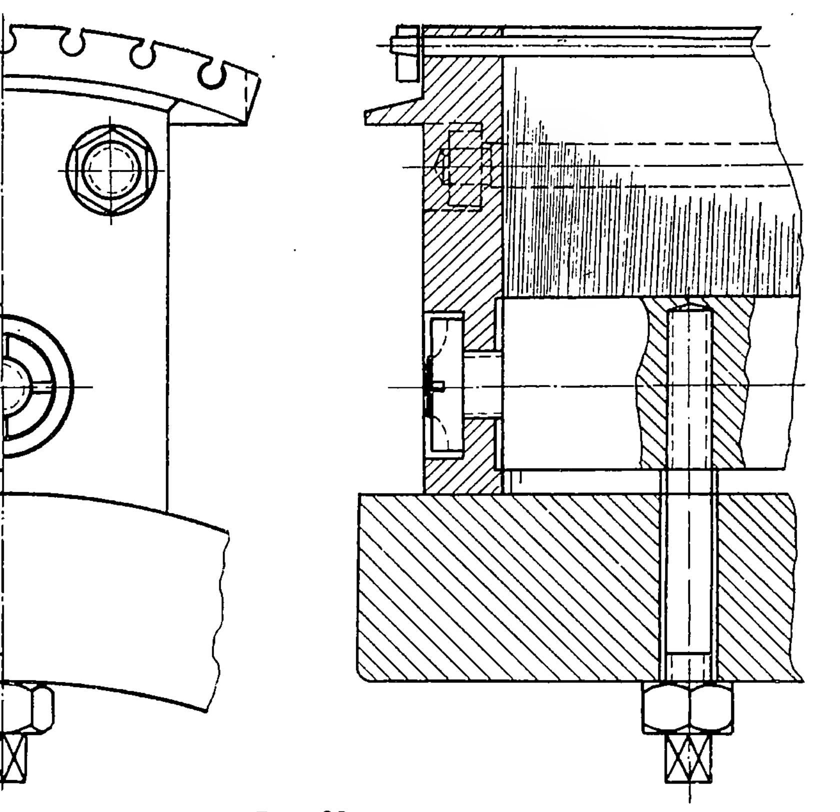


Рис. 38.

ду полюсами ротора (рис. 18, 38). Для быстроходных машин со скоростями вращения 600—1000 об/мин. применено крепление полюсов к ротору Т-образными выступами (рис. 16).

Для уменьшения поверхностных и пульсационных потерь полюсы выполняют полностью из листовой стали толщиной 1,0—1,5 мм. Торцевые щеки — из кованой стали или высокосортного стального литья (рис. 27, 28, 29).

В них утоплены головки заклепок или гайки шпилек, которыми затягиваются полюсы.

Площадь сечения стяжных заклепок принимают равной 1/30 площади штампа полюса, а стяжных шпилек — 1/40.

Глубина ввинчивания болтов в сердечник полюса, собранный из листов, должна быть не менее 2-х диаметров болта.

Тихоходные синхронные машины в сотни и тысячи киловатт строят с массивным кованым ободом ротора, приваренным к диску крестовины, и болтовым креплением полюсов

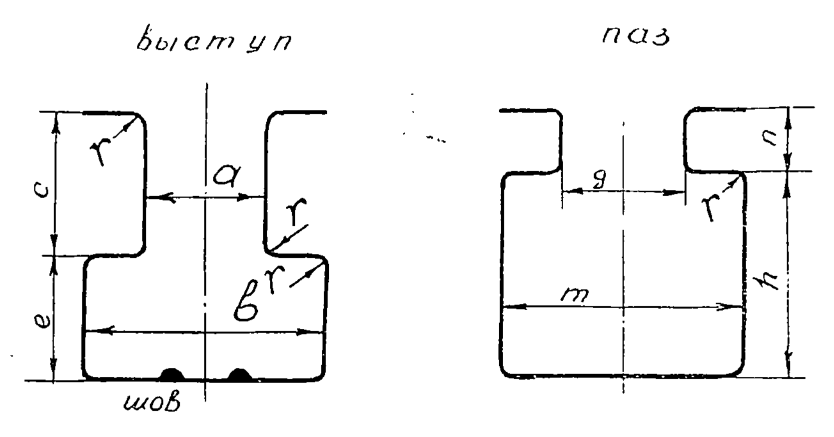


Рис. 39.

(рис. 18, 38). Болты ввинчивают в полюсы с внутренней стороны. В сердечники полюсов впрессованы стержни с резьбой для болтов. Толщина обода выбирается не только по магнитному расчету, но и с учетом необходимого махового момента для создания равномерного вращения ротора при колебаниях нагрузки.

В машинах мощностью свыше ста киловатт применяется также конструкция ротора с сердечником из штампованных листов с пазами и полюсами, снабженными Т-образными вы-

ступами (рис. 39). Крепление полюсов производится при помощи тонких клиньев с уклоном 1 : 100, которые попарно забиваются между пазом и выступом полюса. Для удобства производства размеры пазов и Т-образных выступов нормализованы (табл. 24). В случае необходимости полюс выполняют с двумя выступами, расстояние между которыми обозначено в табл. 24 буквой К.

Для определения № полюса нужно рассчитать: средний радиус полюса (рис. 26)

$$R = H + 0{,}5h_п \text{ см};$$

вес меди катушки на 1 *см* длины

$$G_м = 2abw\,8{,}9 \cdot 1{,}05 \cdot 10^{-3} = 17{,}8\,abw \cdot 10^{-3} \text{ *кг/см*};$$

вес полюса на 1 см длины

$$G_c = S \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см},$$

где S — площадь полюса с полюсным башмаком, *см²*;

Центробежная сила полюса с катушкой на 1 *см* длины

$$C = 11{,}2\,(G_м + G_c)\,R \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \text{ кг/см}.$$

2. Катушки полюсов

Проволочные катушки выполняются из круглого, реже прямоугольного провода с двойной бумажной изоляцией. Катушка получается многовитковой с большим числом слоев (рис. 40). Наматывается она на стальной каркас, изолированный под обмоткой несколькими слоями электрокартона и шайбами из того же материала. Катушки пропитывают лаком и сушат в печи.

Выводы катушек устраивают посредством медных полосок, в которые после сборки впаивают соединительные проводники.

Полосовые катушки выполняют из шинного провода с загибом полосы на узкое ребро (рис. 31, 31а, 31б). Междувитковую изоляцию выполняют из полосок электрокартона, наклеенного лаком в два слоя толщиной 0,2 мм или из нежелезистого асбеста толщиной 0,2 мм. Катушку, нагретую до 180° С, опрессовывают, благодаря чему она превращается в монолит.

3. Контактные кольца

В тихоходных машинах контактные кольца располагают на части вала между подшипником и сердечником ротора—

Рис. 40.

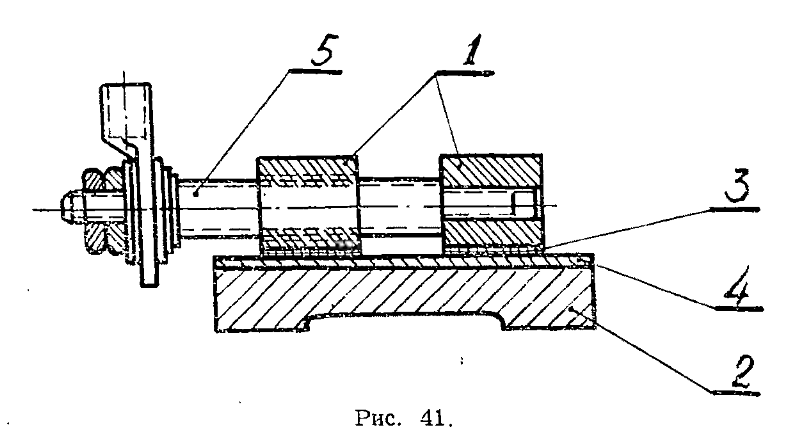


Рис. 41.

1 — контактные кольца; 2 — втулка; 3, 4 — миканит; 5 — шпильки.

Разрез Б-Б

Разрез А-А

Б

А

А

Б

Рис. 42.

внутренняя посадка. Кольца выполняют из стали и насаживают в горячем состоянии на опрессованную миканитом чугунную втулку. Из каждого кольца в сторону ротора выводят по одной или две медных шпильки, изолированных от другого кольца микафолиевой опрессовкой (рис. 41, 42). Втулку с двумя кольцами насаживают на вал ротора со шпонкой.

Контактные кольца можно выполнять литыми (рис. 41) из чугуна.

4. Сердечник статора

Для неразъемного сегментированного статора (14—19 габариты) обычно выбирается целое число C сегментов в одном слое. Каждый сегмент должен иметь целое число пазов Z, так как радиальные линии в местах стыков сегментов должны проходить через середины пазов (рис. 43).

Корпус статора таких машин имеет продольные ребра, приваренные к крайним боковым стенкам. Диаметр расточки ребер — D. Направляющими для сегментов служат круглые шпильки с резьбовыми концами, при помощи которых производится также стягивание пакетов статора.

Из целых листов может быть собран статор с наибольшим внешним диаметром — 99 *см*, так как максимальная ширина листов электротехнической стали — 100 *см*.

Для укрепления лобовых частей обмотки статора, которые подвергаются воздействию больших электромагнитных сил при коротких замыканиях, применяют бандажные кольца. Они устанавливаются в машинах с внешним диаметром статора более 1 *м*.

Размеры бандажных колец: для машин с D до 1 *м* — круглые ⌀ 12 и 15 *мм*; для машин с D более 1 *м* — круглые ⌀ 16, 20, 25 и 30 *мм* или квадратные 22×22 и 32×32 *мм*^{2}.

Крепление бандажных колец показано на рис. 44.

5. Станины

Станины машин переменного тока мощностью до 500 квт отливают из чугуна. Для машин большей мощности применяют сварные станины, состоящие из продольных балок, приваренных к кольцам (рис. 45). Сварные станины дешевле и менее трудоемки, поэтому их применяют также и для многополюсных машин средней мощности.

6. Подшипники

Явнополюсные синхронные двигатели выполняются на 2-х стояковых подшипниках (рис. 46), устанавливаемых на об-

742,14

Д2

40°

612,18

Φ2170

Φ1790

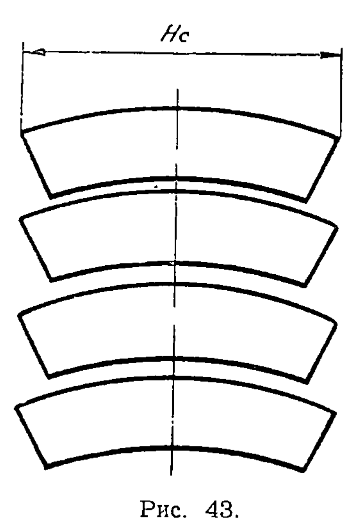


Рис. 43.

щей плите со станиной. При скоростях вращения ниже 1000 об/мин ставят подшипники с кольцевой смазкой.

Размеры и допускаемые нагрузки на подшипники с кольцевой смазкой приведены в табл. 27.

Оформление проекта

Расчет синхронного двигателя выполняется в виде подробной пояснительной записки, содержащей необходимые по-

Рис. 44.

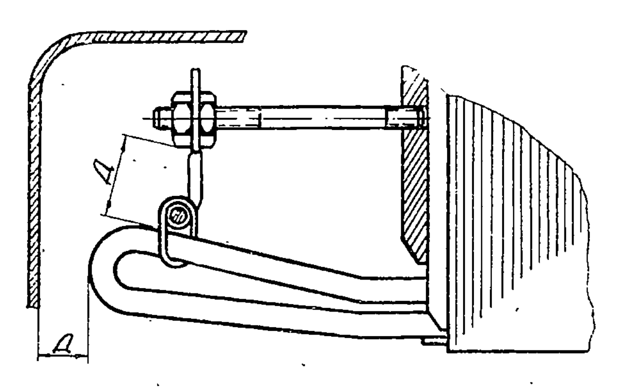


Рис. 45.

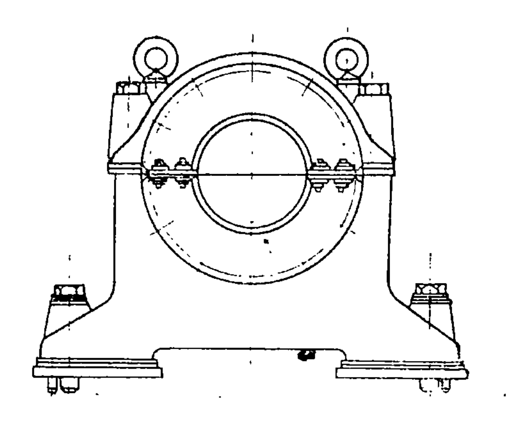
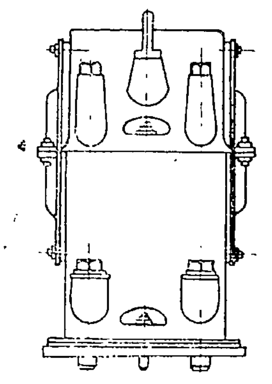



Рис. 46.

яснения, мотивировку выбора тех или иных величин, формулы, применяемые для расчета, численные величины и результаты расчета. Пояснительная записка должна быть иллюстрирована эскизами паза, обмотки возбуждения, схемой магнитной цепи, переписана аккуратно чернилами, сброшюрована и снабжена титульным листом по образцу приложения 3.

Конструктивная разработка проекта выполняется на двух листах чертежей формата 1. На листе 1 показать общий вид синхронного двигателя в 2-х проекциях с разрезами по продольной и поперечной осям, проставить основные размеры, дать спецификацию основных узлов.

На листе 2 подробно показать конструкцию полюса с обмоткой возбуждения.

Чертеж выполнить в двух проекциях с продольным и поперечным разрезами, с исчерпывающей спецификой.

Чертежи проекта выполняются в карандаше согласно действующим ГОСТАм «Чертежи в машиностроении».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А.** Проектирование электрических машин. М., «Энергия», 1969.

2. **Алексеев А. Е.** Конструкция электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1958.

3. **Петров Г. Н.** Электрические машины, ч. 2. Асинхронные и синхронные машины. М., Госэнергоиздат, 1963.

4. **Постников И. М.** Проектирование электрических машин. Киев, 1960 (ГИТЛ).

5. Государственные стандарты, электрические машины. М., Изд-во гос. комитета стандартов при Совете Министров СССР, 1968.



ПРИЛОЖЕНИЯ

ЗАДАНИЕ

на проект синхронного двигателя

Выдано студенту . . . . . курса ЭТФ . . . . . .

Выполнить расчет и конструктивную разработку трехфазного синхронного двигателя со следующими данными:

1. Тип двигателя — СДН общего применения.
2. Мощность двигателя . . . . , *квт*.
3. Номинальное линейное напряжение . . *в*, соединение фаз — звезда.
4. Частота 50 *гц*.
5. Коэффициент мощности 0,9 (ток опережающий).
6. Скорость вращения ——————— *об/мин*.
7. Статическая перегружаемость не менее 1,8.
8. Пусковой момент не ниже 1,5 номинального.
9. Пусковой ток не выше 6,0 номинального.
10. Входной момент не ниже 0,8 номинального.
11. Форма исполнения — открытая на 2-х стояковых подшипниках.
12. Система охлаждения — самовентиляция.
13. Режим работы — длительная нагрузка.
14. Напряжение возбудителя . . . . , в.

Задание выдано « »

Руководитель проекта

ГРАФИК
выполнения курсового проекта синхронного двигателя

№№ п.-п.	Наименование этапа проекта	Оценка этапа, %	Всего, %	Недели по календарю
1.	Определение главных размеров, расчет обмотки, пазов и ярма статора	10	10	
2.	Расчет полюса и х. х. х.	15	25	
3.	Расчет индуктивных сопротивлений и параметров машины	10	35	
4.	Потери, к. п. д. и превышения температуры	10	45	
5.	Пусковые характеристики	15	60	
6.	1-й лист	20	80	
7.	2-й лист	10	90	
8.	Оформление пояснительной записки	10	10	
9.	Защита проекта	10	100	

КРАСНОЯРСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОЕКТ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проект выполнил (подпись)

Студент группы ____________________

(Ф. и. о.)

« » ____________ 197 г.

Проект утвердил

« » ____________ 197 г.

Приложение 4

Синхронные двигатели серии СДН при $U_н=6000$ *в* и опережающем $\cos\varphi_н=0,9$ (ГОСТ 8585-68)

Таблица 1

№ варианта	$P_н$, *квт*	n, *об/мин*	№ п/п	$P_н$, *квт*	n, *об/мин*	№ п/п	$P_н$, *квт*	n, *об/мин*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	250		25	500	500	50	630	
2	320		26	630		51	800	
3	400		27	800		52	1000	
4	500	1000	28	1000		53	1250	
5	630		29	320		54	320	
6	800		30	400		55	400	
7	1000		31	500	375	56	500	
8	250		32	630		57	630	167
9	320		33	800		58	800	
10	400		34	1000		59	1000	
11	500	750	35	320		60	1250	
12	630		36	400		61	320	
13	800		37	500	300	62	400	
14	1000		38	630		63	500	
15	250		39	800		64	630	150
16	320		40	1000		65	800	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17	400		41	320		66	1000	
18	500	600	42	400		67	1250	
19	630		43	500	250	68	320	
20	800		44	630		69	400	
21	1000		45	800		70	500	
22	250		46	1000		71	630	125
23	320		47	320		72	800	
24	500		48	400		73	1000	
			49	500	187			

№ п/п.	$P_п$, *квт*	n, *об/мин*
74	1250	
75	400	
76	500	
77	630	
78	800	100
79	1000	
80	1250	

Значения к. п. д. (%) синхронных двигателей

$P_н$, *квт*	n					
	100	125	150	167	187	214
320		86,5	85,5	88,5	88,5	89,0
400	86,0	88,5	89,0	90,0	89,5	90,8
500	88,5	90,2	90,8	91,2	90,8	92,2
630	89,8	90,8	91,8	91,2	92,0	91,8
800	90,4	90,8	92,0	91,8	92,0	92,2
1000	91,4	91,8	91,2	92,8	92,6	92,6
1250	91,4	92,8	92,4	92,8	93,6	93,4
1600	92,4	93,6	93,2	93,6	93,4	94,4
2000	93,2	93,6	93,8	94,4	94,2	94,2
2500	94,0	94,0	94,4	94,8	94,8	94,6
3200	—	94,4	94,6	94,8	95,3	95,0
4000	—	95,1	95,0	95,0	95,6	95,6
5000	—	—	—	—	—	—
6300	—	—	—	—	—	—
8000	—	—	—	—	—	—
10000	—	—	—	—	—	—

Внешние диаметры пакетов статора асинхронных

Номер габарита	1	2	3
D_a, *мм*	133	153	180
Меньшая сторона листа, *мм*	700	800	750
Припуск на штамповку, *мм*	7	7	7
Номер габарита	10	11	12
D_a, *мм*	590	740	850
Номер габарита	14	15	16
D_a, *мм*	1180	1430	1730

Диаметры D_a габаритов 10н—15н намечаются взамен 10—13-го 125—1000 квт (при 2р=4).

Диаметры D_a габаритов 14—20 применяются при сегментирован свыше 1000 квт (при 2р=4).

Таблица 2

при cos φ=0,9 **новых серий СДН на 6000 и 6300** *в*

об/мин						
250	300	375	500	600	750	1000
89,0	90,2	90,2				
90,0	91,2	91,6	92,6			
92,2	91,6	91,6	93,6	—	—	—
92,8	92,6	93,2	93,6	93,8	—	—
93,2	93,2	93,6	94,0	94,4	94,8	
93,4	93,2	94,0	94,8	94,6	95,4	
					95	
94,0	94,0	94,6	94,8	95,1	94,8	
					95	
93,8	94,8	94,6	95,3	95,7	95,6	
						95,7
94,4	95,0	95,2	95,8	95,7	96,0	95,9
95,1	95,3	95,6	95,7	96,2	95,8	96,4
95,8	95,8	95,6	96,2	96,6	96,4	96,6
95,6	96,2	96,0	96	96,6	96,7	96,6
—	—	—	96,4	96,9	96,6	96,8
—	—	—	96,7	97,1	96,9	97,1
—	—	—	97,1	96,9	97,1	—
—	—	—	97,4	97,2	97,3	—

Таблица 3

и синхронных машин единых серий А и С

4	5	6	7	8		9
208	248	291	343	393		458
860	750/1000	600	700	800		900
7	7	9	7	7		7
13	10н	11н	12н	13н	14ч	15н
990	520	590	660	740	850	990
17	18	19		20		
2170	2600	3250		4250		

для новых серий асинхронных и синхронных машин на мощности

ных статорах для асинхронных и синхронных машин на мощности

Таблица 4

Значения ширины паза $b_{п1}$, *см*

τ, *см*	До 690*в*	3000—3150*в*	6000—6300*в*
15	0,95—1,15	1,2—1,3	1,4—1,6
25	1—1,25	1,2—1,4	1,4—1,7
40	1,1—1,4	1,25—1,6	1,6—1,85
50	1,2—1,6	1,4—1,7	1,7—1,9
70	—	1,5—1,8	1,7—2,1

Таблица 4а

Значения индукции в стальных участках магнитной цепи явнополюсных машин

Участки магнитной цепи	Индукция, *тл*
Ярмо статора	1,18—1,57
Зубцы статора в наиболее узком месте	1,55—1,95
Зубцы статора при полузакрытых трапецеидальных пазах	1,4—1,6
Полюсы	1,4—1,6
Ярмо ротора из литой или листовой стали	1,0—1,3
Ярмо ротора из чугуна	0,55—0,65

Таблица 5

Листовая электротехническая сталь марки Э11, Э12, Э21
(слабо- и среднелегированная)
H=f(B), *а/см*

B, *тл*	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,60	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	8,59	7,79	8,00	8,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1,9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
2,0	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760
2,5	3840	3920	4000	4080	4160	4240	4320	4400	4480	4560

Таблица 6

Листовая электротехническая сталь марки Э31 (повышенно-легированная)

$H = f(B)$, *а/см*

B, *тл*	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	0,44	0,45	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,54	0,55
0,3	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,63	0,64	0,65	0,66
0,4	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
0,5	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
0,6	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07
0,7	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,19	1,22	1,24	1,27	1,30
0,8	1,33	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62
0,9	1,66	1,70	1,74	1,79	1,84	1,89	1,94	1,99	2,05	2,11
1,0	2,17	2,23	2,30	2,37	2,41	2,52	2,60	2,69	2,78	2,88
1,1	2,98	3,09	3,20	3,32	3,45	3,59	3,74	3,90	4,07	4,25
1,2	4,44	4,65	4,87	5,10	5,35	5,62	5,90	6,20	6,52	6,86
1,3	7,22	7,60	8,00	8,50	9,00	9,60	10,3	11,1	12,0	13,0
1,4	14,1	15,3	16,6	18,1	19,7	21,4	23,2	25,1	27,1	29,2
1,5	31,4	33,7	36,1	38,7	41,4	44,2	47,1	50,1	53,2	56,4
1,6	59,8	63,3	67,0	70,9	75,0	79,3	83,8	88,5	93,4	98,6
1,7	101	110	116	123	130	137	145	153	162	171
1,8	181	191	202	214	227	241	256	272	290	311
1,9	335	363	397	437	483	537	597	662	732	806
2,0	883	961	1040	1120	1200	1280	1360	1440	1510	1590
2,1	1670	1750	1830	1910	1990	2070	2150	2230	2310	2390
2,2	2460	2540	2620	2700	2780	2860	2940	3020	3100	3180
2,3	3260	3340	3420	3500	3580	3650	3730	3810	3890	3970
2,4	4050	4130	4210	4290	4370	4450	—	—	—	—

Таблица 7

Листовая сталь толщиной 1—2 *мм* (для полюсов)

H=f(B), *а/см*

B, *тл*	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	1									
0,2	1,4									
0,3	1,8									
0,4	2,1									
0,5	2,5					2,75				
0,6	2,95					3,2				
0,7	3,45					3,75				
0,8	4,05					4,4				
0,9	4,8	4,9	4,95	5,05	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
1,0	5,7	5,82	5,95	6,07	6,15	6,3	6,42	6,55	6,65	6,8
1,1	6,9	7,03	7,2	7,31	7,48	7,6	7,75	7,9	8,08	8,25
1,2	8,45	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,92	10,15	10,45
1,3	10,8	11,12	11,45	11,75	12,2	12,6	13,0	13,5	13,93	14,5
1,4	14,9	15,3	15,95	16,45	17,0	17,5	18,35	19,2	20,1	21,1
1,5	22,7	24,5	25,6	27,1	28,8	30,5	32,0	34,0	36,5	37,5
1,6	40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5	55,8	59,5	62,3	66,0
1,7	70,5	75,3	79,5	84,0	88,5	93,2	98,0	103,0	108,0	114,0
1,8	119,0	124,0	130,0	135,0	141,0	148,0	156,0	162,0	170,0	178,0
1,9	188,0	197,0	207,0	215,0	226,0	235,0	245,0			
2,0	290,0	302,0	315,0	328,0	342,0	361,0	380,0	256,0	265,0	275,0

Таблица 8

Чугун

H = f(B), *а/см*

B, *тл*	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0	1	2	2,8	3,6	4,2	4,6	5	5,4	6,7
0,1	6	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7
0,2	9	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,8
0,3	12,2	12,6	13	13,4	13,8	14,3	14,7	15,1	15,6	16
0,4	16,4	16,9	17,5	18	18,6	19,1	19,7	20,2	20,8	21,4
0,5	22	22,6	23,5	24	24,7	25,5	26,2	27	27,8	28,6
0,6	29,4	30,3	31,3	32,2	33,2	34,2	35,2	36,2	37,2	38,2
0,7	39,2	40,5	41,8	43,2	44,6	46	47,5	49,1	50,7	52,3
0,8	54	55,7	57,5	59,3	61,1	63	65	67,1	69,3	71,4
0,9	73,6	75	77,8	80	83	86	89	92	95	98
1,0	101	105	108	112	116	120	124	128	132	136
1,1	140	144	149	154	159	165	170	175	181	186
1,2	192	198	204	211	218	225	232	240	247	255
1,3	262	270	278	286	294	303	312	321	330	339
1,4	348	359	370	382	392	409	423	436	450	464
1,5	478	494	570	520	545	562	580	600	—	—

Таблица 9

Удельные потери (*вт/кг*) листовой электротехнической стали марки Э11 толщиной 0,5 *мм* при частоте 50 *гц*

В, *тл*	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	1	1,04	1,08	1,11	1,14	1,2	1,2	1,25	1,31	1,35
0,6	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85
0,7	1,9	1,95	2	2,05	2,15	2,15	2,15	2,15	2,2	2,25
0,8	2,3	2,35	2,4	2,45	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75
0,9	2,8	2,85	2,9	2,95	3,0	3,05	3,1	3,15	3,2	3,25
1,0	3,3	3,36	3,42	4,48	3,55	3,62	3,7	3,78	3,86	3,94
1,1	4,02	4,1	4,18	4,26	4,34	4,42	4,5	4,6	4,7	4,8
1,2	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
1,3	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8
1,4	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,6	7,6	7,7	7,8
1,5	7,9	8,0	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
1,6	9,0	9,1	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8
1,7	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4	10,52	10,6	10,76	10,88
1,8	11,0	11,15	11,3	11,45	11,6	11,75	11,9	12,15	12,2	12,35
1,9	12,5	12,65	12,8	12,95	13,1	13,25	13,4	13,55	13,7	13,9

Примечание. Для других марок электротехнической стали значения в таблице нужно умножить на коэффициент k

Марка стали	Э12 0,5	Э21 0,5	Э31 0,5	Э31 0,35	Э41 0,5	Э42 0,5
Коэффициент k	0,97	0,76	0,61	0,49	0,47	0,43

Таблица 10

ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Номинальные диаметры d, сечения s, веса G и сопротивления 1 км меди обмоточной круглой

Диаметр d, *мм*	Сечение s, *мм*²	Вес 1 *км* G, *кг*	Сопротивление 1 км при 15° С, *ом*	Диаметр d, *мм*	Сечение s, *мм*²	Вес 1 *км* G, *кг*	Сопротивление 1 км при 15° С, *ом*
1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	0,00196	0,01746	9100	(0,77)	0,466	4,14	36,9
0,06	0,00283	0,0252	6310	0,80	0,503	4,47	34,2
0,07	0,00385	0,0342	4630	(0,83)	0,541	4,81	31,8
0,08	0,00503	0,0447	3550	0,86	0,581	5,15	29,6
0,09	0,00636	0,0566	2810	(0,90)	0,636	5,66	27,0
0,10	0,00785	0,0698	2270	0,93	0,679	6,04	25,3
0,11	0,00950	0,0845	1813	(0,96)	0,724	6,43	23,8
0,12	0,01131	0,1005	1 524	1,00	0,785	6,98	21,9
0,13	0,01327	0,1180	1286	(1,04)	0,849	7,55	20,3
0,14	0,01539	0,1368	1118	1,08	0,916	8,14	18,79
0,15	0,01767	0,1571	974	(1,12)	0,985	8,75	17,47
0,16	0,0201	0,1788	856	1,16	1,057	9,40	16,28
0,17	0,0227	0,202	758	(1,20)	1,131	10,05	15,22
0,18	0,0255	0,226	674	1,25	1,227	10,91	14,02
0,19	0,0284	0,252	606	(1,30)	1,327	11,80	12,96
0,20	0,0314	0,279	548	1,35	1,431	12,73	12,01
0,21	0,0346	0,308	497	(1,40)	1,539	13,69	11,18

Продолжение табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8
0,23	0,0415	0,369	415	1,45	1,651	14,68	10,41
0,25	0,0491	0,436	351	(1,50)	1,767	15,71	9,74
0,27	0,0573	0,509	300	1,56	1,911	16,99	9,00
0,29	0,0661	0,587	260	(1,62)	2,06	18,32	8,36
0,31	0,0755	0,671	228	1,68	2,22	19,71	7,75
0,33	0,0855	0,760	201	(1,74)	2,38	21,1	7,23
0,35	0,0962	0,855	178,8	1,81	2,57	22,9	6,70
0,38	0,1134	1,008	161,8	(1,88)	2,78	24,7	6,10
0,41	0,1320	1,173	130,3	1,95	2,99	26,5	5,76
0,44	0,1521	1,352	113,2	(2,02)	3,20	28,5	5,38
0,47	0,1735	1,542	99,2	2,10	3,46	30,8	4,97
(0,49)	0,1886	1,676	91,3	2,26	4,01	35,7	4,29
0,51	0,204	1,816	84,4	2,44	4,68	41,6	3,68
(0,53)	0,221	1,961	77,8	2,63	5,43	48,3	3,17
0,55	0,238	2,11	72,3	2,83	6,29	55,9	2,73
(0,57)	0,255	2,27	67,5	3,05	7,31	65,0	2,35
0,59	0,273	2,43	63,0	3,28	8,45	75,1	2,04
(0,62)	0,302	2,68	57,0	3,53	9,79	87,0	1,758
0,64	0,322	2,86	53,4	3,80	11,34	100,8	1,518
(0,67)	0,353	3,13	48,7	4,10	13,20	117,4	1,303
0,69	0,374	3,32	46,0	4,50	15,90	141,4	1,082
(0,72)	0,407	3,63	42,3	4,80	18,10	160,9	0,951
0,74	0,430	3,82	40,0	5,20	21,2	188,8	0,812

Номинальные размеры прямоугольной проволоки (мм)

b, мм									
	0,83	0,90	1,00	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,50
2,1	1,60	1,72	1,89	2,06	2,23	2,42	2,63	2,84	—
2,26	—	1,86	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	—
2,44	—	2,03	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	—
2,63	—	2,20	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	—
2,83	—	2,38	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	—
3,05	—	—	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	—
3,28	—	—	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	—
3,53	2,79	—	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	—
3,8	—	3,25	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	—
4,1	—	—	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	—
4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,4	—	—	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	—
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,7	—	—	4,90	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	—
5,1	—	—	4,89	5,30	5,71	6,17	6,68	7,19	—
5,5	—	—	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	—
5,9	—	—	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	—
6,4	—	—	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	—
6,9	—	—	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	—
7,4	—	—	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	—
8,0	—	—	7,79	8,43	9,07	9,97	10,6	11,4	—
8,6	—	—	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	—
9,3	—	—	—	9,83	10,58	11,4	12,4	13,3	—
10,0	—	—	—	—	11,40	12,3	13,3	14,3	14,8
10,8	—	—	—	—	—	—	14,4	15,5	—
11,6	—	—	—	—	—	—	15,5	16,6	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	17,9	18,5
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 11

и расчетные сечения (*мм*²) (ГОСТ 434-53)

a, мм									
1,56	1,68	1,81	1,95	2,00	2,10	2,26	2,44	2,50	2,63
3,07	3,32	3,32	—	—	3,92	—	—	—	—
3,32	3,59	3,83	—	—	—	4,63	—	—	—
3,60	3,89	4,21	4,55	—	4,64	—	5,37	—	—
3,80	4,21	4,55	4,92	—	5,04	5,46	5,94	—	6,44
4,20	4,54	4,91	5,31	—	5,46	5,92	6,43	—	—
4,55	4,91	5,31	5,74	—	5,93	6,41	6,96	—	7,54
4,91	5,30	5,73	6,19	—	6,41	6,93	7,52	—	8,15
5,30	5,72	6,18	6,67	—	6,93	7,50	8,13	—	8,80
5,72	6,17	6,67	7,20	—	7,50	8,11	8,79	—	9,51
6,19	6,68	7,21	7,79	—	8,13	8,79	9,52	—	10,3
—	—	—	—	—	—	—	—	10	—
6,65	7,18	7,75	8,37	—	8,76	9,46	10,2	—	11,1
—	—	—	—	8,8	—	—	—	—	—
7,12	7,79	8,30	8,96	—	9,39	10,1	11,0	—	11,9
7,75	8,36	9,02	9,74	—	10,2	11,0	11,9	—	12,9
8,37	9,03	9,75	10,5	—	11,1	11,9	12,9	13,3	14,0
8,99	9,70	10,5	11,3	—	11,9	12,8	13,9	—	15,0
9,77	10,6	11,4	12,3	—	12,9	14,0	15,1	—	16,3
0,6	11,4	12,3	13,3	—	14,0	15,1	16,3	—	17,7
1,3	12,6	13,3	14,2	—	15,0	16,2	17,6	—	19,0
2,3	13,2	14,4	15,4	—	16,3	17,6	19,0	—	20,5
3,2	14,2	15,5	16,6	—	17,6	18,9	20,5	—	22,1
4,3	15,4	16,6	17,9	—	19,0	20,5	22,2	—	24,0
5,4	16,6	17,9	19,3	19,8	20,5	22,1	23,9	24,5	25,8
16,6	17,9	19,3	20,9	—	22,2	23,9	25,9	—	27,9
7,8	19,3	20,8	22,4	—	23,9	25,7	27,8	—	30,0
9,4	20,8	22,4	24,2	24,8	25,8	27,8	30,0	30,8	32,4
20,8	22,5	24,2	26,1	—	27,9	30,0	32,4	—	35,0
—	24,2	26,1	28,0	—	30,0	32,3	34,9	—	37,6
—	—	28,0	30,2	—	32,3	34,8	37,6	—	40,5
—	—	—	—	—	—	—	—	39,5	—
—	—	—	32,6	—	34,8	37,5	40,5	—	43,7
—	—	—	—	—	37,3	40,2	43,4	—	46,8

Максимальная толщина

Марка провода	Двусторонняя круглого D—d (*мм*) при 0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,27—0,29	0,31—0,35	0,38—0,49
ПБО	—	—	0,10	0,12	0,12	0,12
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22
АПБД	—	—	—	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14
ПДА	—	—	—	—	—	—

изоляции обмоточных проводов

толщина изоляции						прямоугольного провода B—b (*мм*), при меньшей стороне сечения голого провода, *мм*			
диаметре голого провода d, *мм*									
0,51—0,69	0,72—0,95	1,00—1,45	1,50—1,56	1,62—2,1	2,26—5,00	5,00—5,20	0,83—1,95	2,1—3,8	4,1—5,5
0,12	0,12	0,14	0,14	0,14	—	—	0,14	0,175	0,23
0,22	0,22	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
—	—	0,27	0,27	0,27	0,33	0,35	0,27	0,33	0,44
0,17	0,18	0,21	0,21	0,21	—	—	—	—	—
0,115	0,125	0,135	0,155	0,155	—	—	—	—	—
0,25	0,25	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,40
0,19	0,20	0,21	0,21	0,23	—	—	—	—	—
0,16	0,16	0,18	0,18	—	—	—	0,22	—	—
—	—	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40

Номинальные размеры (*мм*)

b	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
8	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0
8,6	—	—	—	—	—	—	4,30
9,3	—	—	—	—	—	—	4,65
10	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
10,8	—	—	—	—	—	—	5,4
11,6	—	—	—	—	—	—	5,8
12,5	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	5,0	6,25
13,5	—	—	—	—	—	—	6,75
14,0	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	5,6	7,0
14,5	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—
16	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,0
16,8	—	—	—	—	—	—	8,4
18	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	7,2	9,0
19,5	—	—	—	—	—	—	—
20	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
22	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	8,8	11,0
25	2,5	3,75	5,0	6,25	7,5	10,0	12,5
26,3	—	—	—	—	—	—	13,2
28	2,8	4,2	5,6	7,0	8,4	11,2	14,0
30	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	12,0	15,0
32	3,2	4,8	6,4	8,0	9,6	12,8	16,0
35	3,5	5,25	—	—	10,5	—	17,5
40	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0
45	—	6,75	—	—	13,5	—	22,5
47	—	—	—	—	—	—	—
50	5,0	7,5	10	12,5	15,0	20,0	25,0
55	—	—	—	—	16,5	—	27,0
60	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	24,0	30,0
65	—	—	—	—	—	—	—
70	—	—	14,0	—	21,0	28,0	35,3
75	—	—	—	—	22,5	30,0	37,5
80	—	—	16,0	—	24,0	32,0	40,0
90	—	—	—	—	—	—	—
100	—	—	20,0	—	—	—	50,0

Таблица 13

и расчетные сечения лент ($мм^2$)

a								
0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35
4,8	5,6	6,4	7,2	—		—	—	—
5,16	6,02	6,88	7,74	—	—	—	—	—
5,58	6,51	7,44	8,37	9,08	—	—	—	—
6,0	7,0	8,0	9,0	9,78	10,6	—	—	—
6,48	7,56	8,64	9,72	10,6	11,4	12,2	—	—
6,96	8,12	9,28	10,4	11,4	12,3	13,2	14,2	—
7,5	8,75	10,0	11,3	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5
8,1	9,45	10,8	12,2	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8
8,4	9,8	11,2	12,6	—	—	—	—	—
—	—	—	—	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2
—	—	—	—	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7
9,6	11,2	12,8	14,4	—	—	—	—	—
10,1	11,8	13,4	15,1	16,6	17,9	19,2	20,7	22,3
10,8	12,6	14,4	16,2	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9
—	—	—	—	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9
12,0	14,0	16,0	18,0	—	—	—	—	—
13,2	15,4	17,6	19,8	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3
15,0	17,0	20,0	22,5	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4
15,8	18,4	21,0	23,7	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1
16,8	19,6	22,4	25,2	27,8	30,0	32,2	34,7	37,4
18,0	21,0	24,0	27,0	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1
19,2	22,4	25,6	28,8	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8
—	24,5	28,0	—	34,8	37,6	40,3	43,4	46,9
24,0	28,0	32,0	36,0	39,8	43,0	46,1	47,7	53,6
—	31,5	36,0	—	44,8	—	—	55,9	60,4
—	—	—	—	—	—	—	—	—
30,0	35,0	40,0	45,0	49,8	53,8	57,7	62,2	67,1
—	38,5	44,0	—	54,8	—	—	—	—
36,0	42,0	48,0	54,0	59,8	64,6	69,3	74,4	80,6
—	45,5	—	—	64,8	—	—	—	—
42,0	—	56,0	63,0	69,8	—	—	—	—
45,0	52,5	60,0	67,5	74,8	—	—	—	—
48,0	—	64,0	72,0	79,8	—	—	—	—
—	—	72,0	—	—	—	—	—	—
—	—	80,0	—	99,8	—	—	—	—

b							
	1,45	1,5	1,56	1,68	1,81	1,95	2,0
8	—	—	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—
13,5	19,1	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—
14,5	20,6	—	22,1	—	—	—	—
15,6	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—
16	—	23,5	—	—	—	—	—
16,8	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—
18	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—
19,5	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—
20	—	29,5	—	—	—	—	39,1
22	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—
25	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1
26,3	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—
28	40,2	—	43,2	46,4	50,0	53,8	—
30	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1
32	46,0	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—
35	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—
40	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1
45	64,8	—	69,7	75,0	80,8	86,9	—
47	—	—	—	—	—	—	—
50	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1
55	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—
60	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—
65	—	—	100,9	—	—	125,9	—
70	—	—	108,7	—	—	135,7	—
75	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	124,3	—	—	155,2	—
90	—	—	139,9	—	—	174,7	—
100	—	—	155,5	—	—	194,2	—

a								
2,1	2,26	2,44	2,5	2,63	2,83	3,0	3,28	3,53
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
40,0	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
45,3	48,6	52,4	—	—	—	—	—	—
51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
54,3	58,3	62,8	—	67,7	72,7	—	—	—
57,9	62,2	67,0	—	72,2	77,5	82,1	—	—
62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	9,1	—
66,3	71,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
72,6	78,0	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	115,5	118,1	128,9	138,5
93,6	100,6	108,5	—	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
—	—	113,4	—	—	—	—	—	—
104,1	111,9	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8
114,6	123,2	132,9	—	143,2	154,0	163,1	178,1	191,5
125,1	134,5	145,1	—	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
—	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
—	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
—	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
—	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—

Номинальные размеры (*мм*)

b	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7	8
16	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	199,1
30	—	—	—	—	179,1	194,1	209,1	239,1
32	—	—	—	—	191,1	207,1	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	226,6	—	279,1
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	259,1	279,1	319,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	324,1	349,1	349,1
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	356,6	384,1	439,1
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	389,1	419,1	479,1
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	454,1	—
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	**559,1**
75	—	—	—	—	—	—	—	599,1
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	559,1	639,1
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	629,1	719,1
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	699,1	799,1
120	—	—	—	—	—	—	—	959,1

Таблица 14

и расчетные сечения шин (мм²)

a									
9	10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
—	—	175,1	199,1	233,1	255,1	—	—	—	—
—	199,1	219,1	249,1	279,1	319,1	359,1	399,1	—	—
224,1	249,1	274,1	311,6	349,1	399,1	449,1	499,1	624,1	—
269,1	299,1	329,1	374,1	419,1	479,1	539,1	599,1	749,1	899,1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	349,1	—	436,6	—	—	—	699,1	—	—
359,1	399,1	439,1	499,1	559,1	639,1	719,1	799,1	999,1	1199,1
404,1	449,1	494,1	561,6	629,1	719,1	809,1	899,1	—	1349,1
449,1	499,1	549,1	624,1	699,1	799,1	899,1	999,1	—	—
494,1	549,1	—	686,6	—	879,1	—	1099,1	—	—
539,1	599,1	—	749,1	—	959,1	—	1199,1	—	—
584,1	689,1	—	811,6	—	1039,1	—	—	—	—
629,1	699,1	—	874,1	—	1119,1	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	799,1	—	999,1	—	—	—	—	—	—
—	899,1	—	1124,1	—	—	—	—	—	—
—	999,1	—	1249,1	—	—	—	—	—	—
—	1199,1	—	—	—	—	—	—	—	—

Непрерывная компаундированная изоляция статорных обмоток на напряжение

Часть обмотки		Позиция на рис. 12	Класс А, усиленно	
			Материал	
			наименование	толщина, мм
Пазовая	На катушечную сторону	1	Микалента	0,13
		2	Лента тафтяная	0,25
			Разбухание изоляции от компаундирования	—
			Толщина изоляции катушечной стороны	—
	На паз	3	Электрокартон ЭВ	0,2
		4	То же	0,5
		5	»	0,5
		6	»	0,5
		7	Клин текстолитовый	Не менее 3
			Допуск на укладку	—
			Всего на паз без клина	—
Лобовая	На катушечную сторону	8	Микалента	0,13
		9	Лента тафтяная	0,25
			Разбухание изоляции от компаундирования	—
			Толщина изоляции катушечной стороны	—

при открытых пазах для машин различных исполнений до 690 *в*

влагостойкое исполнение

Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
3 слоя вполнахлеста 1 слой встык		1,6 0,5	1,6 0,5
—	—	0,8	1,2
—	—	2,9	3,3
2	3	0,4	0,6
—	1	—	0,5
—	1	—	0,5
—	1	—	0,5
—	—	—	—
—	—	+0,3	+0.3
—	—	3,6	9.2
3 слоя вполнахлеста 1 слой вполнахлеста		1,6 1.0	1,6 1.0
—	—	1,2	1,5
—	—	3,8	4,1

Таблица 16

Непрерывная компаундированная изоляция статорных обмоток на напряжения 3000—3150 *в*

Часть обмотки		Позиция на рис. 11, 12	Класс А, нормальное исполнение					
			Материал		Количество слоев		Толщина, изоляции, *мм*	
			наименование	толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая	На катушечную сторону	2	Микалента	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6
		3	Лента тафтяная	—	1 слой встык		0,5	0,5
			Разбухание от компаундирования	—	—		0,7	2,0
			Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		3,8	5,1
	На паз	4	Электрокартон ЭВ	0,5	—	1	—	0,5
		5	То же	1,0	—	1	—	1,0
		6	»	0,5	—	1	—	0,5
			Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5
			Всего на паз без клина	—	—	—	4,1	12,7
Лобовая	На катушечную сторону	8	Микалента	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6
		9	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,8
			Разбухание от компаундирования	—	—		1,0	2,5
			Толщина изоляции на катушечную сторону	—	—		4,6	6,1

Таблица 17

Непрерывная компаундированная изоляция статорных обмоток на напряжения 6000—6300 *в*

Часть обмотки	Позиция на рис. 11, 12	Класса А, нормальное исполнение					
		Материал		К-во слоев		Толщина изоляции, *мм*	
		наименование	толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
На катушечную сторону	2	Микалента	0,17	7 слоев вполнахлеста		4,7	4,7
	3	Лента тафтяная	0,25	1 слой встык		0,5	0,5
		Разбухание от компаундирования	—	—		0,2	2,25
		Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		5,4	7,45
Пазовая. На паз	4	Электрокартон ЭВ	0,5	—	1	—	0,5
	5	То же	1,0	—	1	—	0,1
	6	»	0,5	—	1	—	1,0
		Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5
		Всего на паз без клина	—	—	—	5,7	17,9
На катушечную сторону	8	Микалента	0,17	6 слоев вполнахлеста		4,1	4,1
Лобовая	9	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0
		Разбухание от компаундирования	—	—		0,5	3,0
		Толщина изоляции на катушечную сторону	—	—		5,6	8,1

Значения 100 $\delta_д$ при q дробное число

q	$\beta = y/\tau$	$100\delta_д$ без низших гармоник	$100\delta_д$ без низших гармоник	q	β	$100\delta_д$, включая низшие гармоники	$100\delta_д$, включая низшие гармоники
$1\frac{7}{11}$	0,815	3,6	4,5	$2\frac{4}{13}$	0,867	2,0	3,0
	0,612	4,1	4,8		0,723	2,1	3,0
$1\frac{5}{7}$	0,972	3,9	5,7	$2\frac{3}{8}$	0,983	2,3	2,8
	0,778	3,5	5,0		0,842	2,2	2,6
$1\frac{3}{4}$	0,953	3,5	5,4	$2\frac{1}{2}$	0,933	1,7	1,8
	0,760	3,4	4,9		0,800	1,7	1,8
$1\frac{4}{5}$	0,926	3,3	5,2	$2\frac{7}{11}$	0,885	1,7	2,0
	0,742	3,4	4,9		0,760	1,8	2,0
$1\frac{7}{8}$	0,890	3,0	5,1	$2\frac{3}{4}$	0,969	1,5	2,3
	0,712	3,4	5,1		0,850	1,3	2,0
$1\frac{11}{13}$	0,903	3,0	5,0	$2\frac{6}{7}$	0,933	1,4	2,3
	0,723	3,3	5,0		0,817	1,3	2,1
$2\frac{1}{11}$	0,958	2,8	4,4	$2\frac{7}{8}$	0,928	1,4	2,3
	0,798	2,7	3,0		0,812	1,5	2,3
$2\frac{1}{5}$	0,910	2,1	3,4	$2\frac{10}{13}$	0,964	1,5	2,4
	0,758	2,2	3,3		0,842	1,4	2,2
$2\frac{1}{4}$	0,890	2,0	3,2	$3\frac{1}{2}$	0,950	1,1	—
	0,740	2,1	3,1		0,857	0,83	
$2\frac{2}{7}$	0,874	2,0	3,1	—	—	—	—
	0,730	2,1	3,0				

Таблица 19

Значения 100 $\delta_д$ при q = целое число

Укорочение шага в пазовых делениях	q					
	1	2	3	4	5	6
0	9,7	2,85	1,41	0,89	0,65	0,52
1	9,7	2,35	1,15	0,74	0,53	0,45
2		2,85	1,11	0,62	0,44	0,36
3		2,70	1,41	0,69	0,43	0,30
4			1,38	0,89	0,55	0,31
5				0,86	0,65	0,42
6					0,63	0,52
7					0,60	0,52
8						0,55

Таблица 20

Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью свыше 100 *квт*

Материал		Кол-во слоёв	Общая толщина на сторону, *мм*	Примечание
наименование	толщина, *мм*			
Медь полосовая	—	—	—	—
Бумага асбестовая электроизоляционная	0,2	2	0,4	Для классов А, Е и В применяется лакировка глифтальбакелитовым лаком, для классов Н и F — лаком на кремнийорганической основе
Миканит формовочный (микафолий, или стекломикафолий)	0,5 (0,2)	3	1,5 (1,6)	Для обмоток в тропическом и химически стойком исполнениях применять только стекломикафолий или формовочный миканит
Миканит прокладочный	0,5	1	0,5	Промежутки между шайбами и сердечником заполняются электроизоляционной замазкой.
Стеклотекстолит	5,0	1	5,0	
То же	Не менее 8,0	1	8,0	Для класса А нормального исполнения вместо стеклотекстолита применяется гетинакс

Таблица 21

Расчет пусковых характеристик

$$r_{вs} = r'_{в}/s;\ r_{yds} = r_{yd}/s;\ r_{yqs} = r_{yq}/s.$$

$$Y_{ad} = -j\frac{1}{x_{ad}} = -jb_{ad}$$

$$Y_{вs} = \frac{r'_{вs} - jx_{в\sigma}}{r'^2_{вs} + x^2_{в\sigma}} = g_{вs} - jb_{вs}$$

$$Y_{yds} = \frac{r'_{yds} - jx_{y\sigma d}}{r^2_{yds} + x^2_{y\sigma d}} = g_{yds} - jb_{yds}$$

$$Y'_{ds} = Y_{ad} + Y_{вs} + Y_{yds} = g'_{ds} - jb'_{ds}$$

$$Z_{ds} = jx_{\sigma} + \frac{g'_{ds} + jb_{ds}}{g'^2_{ds} + b'^2_{ds}} = r_{ds} + jx_{ds}$$

$$Y_{aq} = -j\frac{1}{x_{aq}} = -jb_{aq}$$

$$Y_{yqs} = \frac{r_{yqs} - x_{y\sigma q}}{r'^2_{yqs} + x'^2_{y\sigma q}} = g_{yqs} - jb_{yqs}$$

$$Y'_{qs} = Y_{aq} + Y_{yqs} = g'_{qs} - jb'_{qs}$$

$$Z = jx_{\sigma} + \frac{g'_{qs} + jb'_{qs}}{g'^2_{qs} + b'^2_{qs}} = r_{qs} + jx_{qs}$$

$$\dot{I}' = \frac{U}{2}\left(\frac{r_{ds} - jx_{ds}}{r^2_{ds} + x^2_{ds}} + \frac{r_{qs} - jx_{qs}}{r^2_{qs} + x^2_{qs}}\right) = \frac{U}{2}\left[(g_{ds} + g_{qs}) - j(b_{ds} + b_{qs})\right]$$

$$\dot{I}'' = \frac{U}{2}\left(\frac{r_{qs} - jx_{qs}}{r^2_{qs} + x^2_{qs}} - \frac{r_{ds} - jx_{ds}}{r^2_{ds} + x^2_{ds}}\right) = \frac{U}{2}\left[(g_{qs} - g_{ds}) - j(b_{qs} - b_{ds})\right]$$

$$I \approx \sqrt{I'^2 + I''^2}$$

$$I_a = \frac{U}{2}(g_{ds} + g_{qs})$$

$$M = UI'_a\frac{1}{\cos\varphi_н}$$

Таблица 22

Данные расчета пусковых характеристик

S	1,0	0,5	0,25	0,1	0,05
$r_{вs}$					
r_{yds}					
r_{yqs}					
Y_{ad}					
$Y_{вs}$					
Y_{yds}					
Y'_{ds}					
Z_{ds}					
Y_{aq}					
Y_{yqs}					
Y'_{qs}					
Z_{qs}					
$\dot{I}'$					
$\dot{I}''$					
$\dot{I}$					
I'_a					
M					

Таблица 23

Данные расчета характеристики холостого хода

E_0, *доли единиц*	0.5	1	1,1	1,2	1,3
E_0, *в*					
$\Phi = C_1E_0$, *вб*					
$B_\delta = C_2\Phi$, *тл*					
$B_{z1/3} = C_3\Phi$, *тл*					
$B_c = C_4\Phi$, *тл*					
$H_{z1/3}$, *а/см*					
H_c, *а/см*					
$F_\delta = C_5B_\delta$, *а*					
$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1/3}$, *а*					
$F_c = l_cH_c$, *а*					
$F_1 = F_\delta + F_{z1} + F_c$, *а*					
$\Phi_\sigma = C_6F_1$, *вб*					
$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$, *вб*					
$B_m = C_7\Phi_m$, *тл*					
$B_p = C_8\Phi$, *тл*					
H_m, *а/см*					
H_p, *а/см*					
$F_m = 2L_mH_m$, *а*					
$F_p = l_pH_p$, *а*					
$F_{\delta_m} = C_9b_m$, *а*					
$F_в = F_1 + F_m + F_p + F_{\delta_m}$, *а*					
$F_в$, *д. е.*					

№ выступа	Размеры выступа, *мм*					
	a	b	c	e	R	r
1	12	24	24	12	—	1
2	20	40	38	20	—	1,5
3	26	52	50	25	80	1,5
4	32	65	58	32	98	1,5
5	38	70	58	32	110	1,5

Таблица 24

Размеры паза, *мм*				Толщина листа, *мм*	Допускаемая нагрузка, *кг/см*	
g	m	h	n		Выступ не проварен	Выступ проварен
14	26	25	12	0,5 1	450 600	60 1000
22	42	40	20	1 1,5	800 1500	1100 2000
29	55	52	25	1 1,5	700 2100	1100 2800
35	69	60	32	1 1,5	620 2200	1300 2900
42	74	60	32	1 1,5	530 2500	1800 3400

Таблица 25

Высота оси вращения электрических машин (*мм*) по ГОСТ 13267-67

25	40	63	100	180	280	450	710
			112				
28	45	71	132	200	315	500	800
			(125)				
32	50	80	(140)	225	355	560	900
				(236)			
36	56	90	160	250	400	(600)	1000
						630	

Таблица 26

Концы валов цилиндрические электрических машин по ГОСТ 12080-66

Диаметр, *мм*	Длина, *мм*	Диаметр, *мм*	Длина, *мм*
60 65 70	140	130 140 150	250
75 80 85 90 95	170	160 170 180	300
100 110 120 125	210	190 200 220	350

Допускаемые нагрузки на подшипники

Размеры, мм	Скорость вращения,					
	125	150	167	187	214	250
100×130						
110×130						
120×140						
130×140						
140×150						
150×150						
160×160						
180×180						
						2200
200×200					2650	2900
220×220				3150	3350	3650
250×250			4250	4400	4650	4950
280×280		5350	5550	5800	6100	6600
300×300		6300	6600	6900	7300	7800
350×350	8500	9100	9550	10000	10500	11400
400×400	11500	12500	13000	13600	14400	15500
450×450	15500	16500	17300	18000	19000	20500
500×500	20000	20500	22300	23200	24600	26500

Таблица 27

с кольцевой смазкой, Кг

об/мин							
300	375	428	500	600	750	1000	1500
		900	1000	1100	1200	1400	1600
	1000	1100	1200	1300	1400	1600	1900
	1250	1350	1450	1550	1700	2000	2400
1200	1400	1500	1600	1750	1900	2250	2600
1450	1650	1750	1850	2050	2250	2600	3000
1600	1800	1900	2050	2250	2400	2800	3250
1850	2050	2200	2350	2550	2800	3200	
2450	2700	2900	3100	3350	3700	4200	
3150	3450	3650	3900	4200	4700	5300	
3950	4300	4600	4850	5400	5900	6600	
5350	5800	6100	6600	7200	790		
7150	7750	8200	8750	9400	10400		
8450	9100	9700	10300	11100	12250		
12200	13400	14000	15000	1600			
16600	18200	19000	20800	22400			
22000	24100	25600	27300				
29000	32000	34000					

СОДЕРЖАНИЕ

Мария Андреевна Мураховская,

Анатолий Федорович Блинов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

(Учебное пособие)

Редактор *Г. К. Гавриленко*

Корректор *Л. А. Китаева*

Сдано в набор 28. IV. 1973 г. Подписано в печать X. 1973 г. Формат бумаги 60×84/16. Объем 7 п. л. Тираж 600 экз. Заказ 197. АЛ01233. Цена 20 коп.

Тип. «Красноярский рабочий», г. Красноярск, пр. Мира, 91.

Цена 20 коп.